

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

## SLEDOVÁNÍ VLIVU KERAMICKÉ VAZBY NA VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH ŽÁROMATERIÁLŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

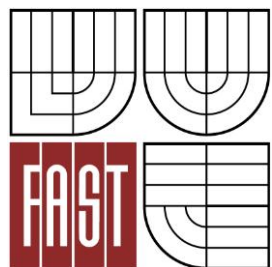
AUTHOR

Bc. JAKUB FRIČEK

BRNO 2013



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

## **SLEDOVÁNÍ VLIVU KERAMICKÉ VAZBY NA VLASTNOSTI IZOLAČNÍCH ŽÁROMATERIÁLŮ**

MONITORING THE INFLUENCE OF CERAMIC BOND ON THE PROPERTIES OF INSULATING  
REFRACTORY MATERIALS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. JAKUB FRIČEK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. LENKA NEVŘISOVÁ, Ph.D.**

BRNO 2013



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. JAKUB FRIČEK
<b>Název</b>	Sledování vlivu keramické vazby na vlastnosti izolačních žáromateriálů
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	Ing. Lenka Nevřivová, Ph.D.
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	31. 3. 2012
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	11. 1. 2013
V Brně dne 31. 3. 2012	

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

1. STAROŇ J., TOMŠŮ F. Žiaruvzdorné materiály, 2000
2. PYTLÍK, P., SOKOLÁŘ, R. Stavební keramika technologie, vlastnosti a využití, Brno 2002
3. VEJVODA J., SCHMID I. Žárovzdorná a izolační staviva, 1999
4. ŠAŠEK, L., BARTUŠKA, M. Laboratorní metody v oboru silikátů, Praha 1981
5. KUTZENDORFER J., MÁŠA Z. Žárovzdorné tepelně izolační materiály, 1991
6. HERAINOVÁ, M. Žárovzdorné materiály, 2003
7. KUTZENDORFER, J. Žárovzdorné materiály II, 1995
8. KUTZENDORFER, J., VÍDEŇSKÁ, M. Žárovzdorné materiály I, VŠCHT Praha 1992
9. Platné normy, internetové zdroje, odborné časopisy, diplomové práce.

## **Zásady pro vypracování**

Tepelně izolační žáromateriály jsou nedílnou součástí každého tepelného agregátu snižující jejich energetickou náročnost. Hledání možností výroby izolačních materiálů s nižšími výrobními náklady je a bude stále aktuálnější, především ve zpracování a zhodnocení odpadních surovin.

Náplní teoretické části je rozdělení žárovzdorných materiálů, klasifikace tepelně izolačních žáromateriálů, technologie výroby izolačních žáromateriálů společně se surovinami používanými pro výrobu tepelně izolačních žáromateriálů.

Experimentální část zaměřte na výrobu izolačních žáromateriálů na bázi škváry, dinasového zlomu frakce 0-0,5, expandovaného perlitu, případně pilin s pórovinovými jíly a odzkoušejte možnosti zvýšení pevnostních charakteristik použitím jílu s nižší teplotou slinutí. Možnost modifikace použitím směsných jílu ověřte jak u technologie lisování z drolenky, tak i u plastické technologie za použití vyhořívajících přísad, pilin. Doporučená teplota výpalu u vzorků pro dosažení rozměrové stálosti v žáru je 850 °C, 1050 °C a 1150 °C.

## **Předepsané přílohy**

.....  
Ing. Lenka Nevřivová, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **Abstrakt v ČJ**

Tepelně izolační žáromateriály jsou nedílnou součástí každého tepelného agregátu, protože snižují jeho energetickou náročnost. Hledání možností výroby při nižších výrobních a surovinových nákladech je při současném trendu šetření, ať už financí či životního prostředí, stále důležitější. Určitou cestou je zhodnocení odpadních surovin. Náplní teoretické části je rozdělení žárovzdorných materiálů, klasifikace tepelně izolačních žáromateriálů a technologie výroby. Experiment je zaměřen na výrobu izolačních žáromateriálů vyráběných z plastického těsta s možností využití pilin a lisováním ze zavlhle směsi se zaměřením na škváru. U obou těchto technologií bude testována možnost modifikace použitím směsných jíílů a možnost zvýšení pevnosti pomocí jíílů s nižší teplotou slinutí.

## **Klíčová slova v ČJ**

jííl, keramika, izolační materiály, žárovzdornost, žáromateriály, tepelná vodivost, pevnost

## **Abstract in ENL**

Thermal insulating refractories are an integral part of each thermal unit since they reduce its energy consumption. The current phenomenon of saving in both environmental and financial aspects reflects in searching for such possibilities to produce at lower manufacturing and material costs. One of the possible ways is to valorise waste materials. The theoretical part then deals with the division of refractory materials, classification of thermal insulation refractory materials and manufacturing technologies. The experiment is focused on the production of insulating refractory materials made from plastic dough with a possibility of using sawdust and materials made by pressing mixture moist, with a focus on coal bottom ash. Both of these technologies will be tested for the possibility of modification by using mixed clays and of increasing the strength by using clays with lower sintering temperature.

## **Keywords in ENL**

clay, ceramics, insulation materials, heat resistance, refractory materials, thermal conductivity, tensile strenght, compressive strenght

### **Bibliografická citace VŠKP**

FRIČEK, Jakub. *Sledování vlivu keramické vazby na vlastnosti izolačních žáromateriálů*. Brno, 2012. 102 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Nevřivová, Ph.D..

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 29.12.2012

.....  
podpis autora  
Jakub Friček

**Poděkování:**

Děkuji vedoucí své diplomové práce, Ing. Lence Nevřivové, Ph.D., za odbornou pomoc a cenné rady, jež významně napomohly k vypracování této diplomové práce.





## Obsah

1. ÚVOD.....	4
2. TEORETICKÁ ČÁST .....	5
2. 1 Cíl teoretické části .....	6
2. 2 Rozdělení keramických surovin.....	6
2.2.1 Plastické suroviny .....	6
2.2.1.1 Jílové minerály.....	7
2.2.1.2 Keramická vazba .....	10
2.2.2 Neplastické suroviny.....	12
2.2.2.1 Ostřiva .....	12
2.2.2.2 Lehčiva .....	13
2.2.2.3 Taviva .....	14
2. 3 Rozdělení jílu .....	15
2.3.1 Zásoby a ceny jílu v ČR.....	17
2. 4 Žárovzdorné materiály.....	20
2.4.1 Rozdělení žárovzdorných materiálů .....	21
2.4.2 Klasifikace žáromateriálů .....	23
2.4.2.1 Klasifikace žáromateriálů izolačních tvarových dle EN .....	23
2.4.2.2 Klasifikace žáromateriálů izolačních tvarových dle ASTM .....	25
2.4.3 Technologie výroby izolačních žáromateriálů.....	26
2.4.3.1 Technologie výroby přidavkem vyhořívajících materiálů.....	26
2.4.3.2 Technologie výroby přidavkem plniva s nízkou objemovou hmotností .....	27
2.4.3.3 Technologie výroby napěněním .....	27
2.4.3.4 Technologie výroby vývinem plynů.....	28
2.4.3.5 Technologie výroby přidavkem těkavých látek .....	28
2.4.3.6 Technologie výroby kombinováním různých způsobů .....	29
2.4.4 Použití izolačních žáromateriálů.....	29
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	33
3.1 Cíl experimentální části .....	34
3.2 Metodika prací .....	34
• ČÁST A - Zkušební tělesa připravená technologií z plastického těsta .....	35
3.3 Použité suroviny .....	38

3.4 Návrh receptur .....	40
3.5 Příprava zkušebních těles .....	40
3.6 Metodika testování zkušebních těles za surova.....	41
3.6.1 Stanovení deformačního poměru dle Pfefferkorna (ČSN 721074).....	41
3.6.2 Stanovení vlhkosti pracovní hmoty .....	42
3.6.3 Stanovení citlivosti k sušení dle Bigota (ČSN 72 1565-11) .....	42
3.7 Metodika testování zkušebních těles po vysušení .....	43
3.7.1 Stanovení smrštění sušením .....	43
3.8 Metodika testování zkušebních těles po výpalu .....	43
3.8.1 Stanovení smrštění pálením.....	44
3.8.2 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu zkušebních těles .....	44
3.8.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti .....	45
3.8.4 Stanovení objemové hmotnosti, zdánlivé pórovitosti a zdánlivé hustoty .....	46
3.8.5 Stanovení nasákavosti .....	47
3.8.6 Stanovení mineralogického složení .....	48
3.8.7 Stanovení distribuce pórů.....	48
3.9 Výsledky experimentů na zkušebních tělesech vyráběných technologií z plastického těsta .....	49
3.9.1 Stanovení vlhkosti pracovní hmoty .....	49
3.9.2 Citlivost k sušení dle Bigota.....	50
3.9.3 Smrštění sušením .....	54
3.9.4 Smrštění pálením, smrštění celkové.....	55
3.9.5 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu .....	56
3.9.6 Stanovení objemové hmotnosti, zdánlivé pórovitosti a zdánlivé hustoty .....	57
3.9.7 Nasákavost .....	63
3.9.8 Stanovení součinitele tepelné vodivosti $\lambda$ .....	64
3.9.9 Mineralogické složení RTG - difrakční analýzou .....	65
3.9.10 Stanovení distribuce pórů .....	68
3.10 Diskuse výsledků části A .....	69
• <b>ČÁST B</b> - Zkušební tělesa vyrobená lisováním ze zavlhle směsi .....	76
<b>ČÁST B1</b> - Porovnávání různých keramických vazeb .....	76
3.11 Použité suroviny .....	76
3.11.1 Plastické suroviny .....	76
3.11.2 Neplastické suroviny.....	79
3.12 Návrh receptur .....	81

3.13 Příprava zkušebních těles .....	82
3.14 Metodika testování zkušebních těles .....	83
3.14.1 Stanovení ztráty žíháním.....	83
3.14.2 Stanovení pevnosti v tlaku .....	84
3.15 Výsledky experimentů .....	85
3.15.1 Smrštění sušením .....	85
3.15.2 Smrštění pálením, smrštění celkové .....	85
3.15.3 Pevnost v tlaku .....	86
3.15.4 Stanovení objemové hmotnosti .....	87
3.15.5 Ztráta žíháním .....	88
3.15.6 Stanovení součinitele tepelné vodivosti .....	89
3.16 Diskuse výsledků části B1.....	90
<b>ČÁST B2 - Využití škváry pro výrobu izolačních materiálů</b> .....	91
3.17 Použité suroviny .....	91
3.18 Návrh receptur .....	92
3.19 Příprava tělěs .....	93
3.20 Metodika testování zkušebních těles .....	94
3.21 Výsledky testování zkušebních těles .....	94
3.21.1 Objemová hmotnost.....	94
3.21.2 Chemické složení .....	95
3.21.3 Pevnost v tlaku .....	95
3.21.4 Součinitel tepelné vodivosti .....	96
3.21.5 Vizuální posouzení (černé jádro) .....	96
3.22 Diskuse výsledků části B2.....	98
4. <b>ZÁVĚR</b> .....	99

# 1. ÚVOD

V současné době se klade ve všech odvětvích průmyslu silný důraz na ekologii a šetření energiemi. Ztráty energií při výpalech se minimalizují vhodnými keramickými žárovzdornými izolačními výrobky a ty mají proto velký vliv jak na cenu výrobku, tak na ekologičnost výroby. Základním stavebním kamenem každé keramické výroby žárovzdorných či nežárovzdorných výrobků je jíla.

Výraz jíla se vztahuje na přírodní materiál (nezpevněnou klastickou horninu) obsahující z více než 50 % jemnozrnné částice o velikosti pod 2  $\mu\text{m}$ . Je častou složkou jiných klastických hornin, zvláště pak pískovců a karbonátových hornin (vápenců). Obvykle je v kontaktu s větším množstvím vody plastický a nabývá pevností při vysušení či vypálení. Ačkoli jíla obvykle obsahuje především jílové minerály, může obsahovat i jiné prvky, které ovlivní charakteristické vlastnosti, z nichž nejběžnější jsou křemen, slída,  $\text{CaCO}_3$ , sloučeniny železa, organické látky aj. Jílové suroviny jsou základem pro výrobu keramických výrobků, které tudíž nelze vyrobit ze surovin jiných.

Žáromateriály jsou takové materiály a výrobky, které dobře odolávají vysokým teplotám a udržují si své vlastnosti a stabilitu. Musí být i v těchto podmínkách fyzikálně a chemicky stabilní, musí vykazovat rozměrovou stálost v žáru a ideálně také odolné proti termickému šoku jako jsou náhlé změny teplot. Žáromateriály izolační se používají k ochraně konstrukcí namáhaných vysokým teplotním zatížením a pro odizolování prostředí s vysokou teplotou od prostředí s teplotami běžnými. Musí se vykazovat dobrými vlastnostmi v oblasti tepelné vodivosti, pórovitosti apod.

Cílem této diplomové práce je otestovat vlastnosti několika navržených receptur s odlišnou keramickou vazbou. Dále také vybrat takovou směs, která bude z ekonomického hlediska pro výrobu izolačních žáromateriálů optimální. U navržených receptur jsme také optimalizovali teplotu výpalu.

## **2. TEORETICKÁ ČÁST**

## 2. 1 Cíl teoretické části

Tato část diplomové práce bude věnována především rozdělení žárovzdorných materiálů, klasifikaci tepelně-izolačních žáromateriálů a technologiím, které se pro výrobu žáromateriálů používají. Také budou zmíněna ložiska jílu v České Republice.

## 2. 2 Rozdělení keramických surovin

Keramické suroviny jsou získávány z přírodních zdrojů těžením buď primárním přímo za účelem jejich získání, či sekundárním jako doprovodná surovina při povrchové těžbě uhlí nebo kaolínu. Druh a kvalita suroviny jsou základním parametrem pro možnosti a způsoby jejich dalšího použití do samotné výroby. Vlastnosti suroviny pak udávají vlastnosti výsledného materiálu. Ty lze zlepšovat či modifikovat jak obměnou technologie výroby, tak změnou poměrů mezi jednotlivými složkami a tím tedy návrhem celé směsi. Obecně je tedy možno říci, že jakost keramiky závisí na jakosti suroviny.

Z tohoto pohledu jsou primárními ukazateli kvality čistota, mineralogie a také chemické složení.

Rozdělení surovin podle zpracovatelnosti v kontaktu s vodou:

- a) plastické
- b) neplastické

### 2.2.1 Plastické suroviny

Jedná se o keramické jíly a hlíny. Jíl jako výchozí surovina keramických materiálů zásadním způsobem ovlivňuje konečné vlastnosti výrobku. Jejím mineralogicko-chemickým složením udává svou vhodnost či nevhodnost do výrobku, a proto se musí výběru suroviny věnovat maximální pozornost. Vlastnosti plastických surovin ovlivňuje přítomnost různých minerálů. Tyto minerály se také zasluhují o to, že jíly mají vlastnost, která je nezbytná k výrobě keramiky – plastičnost. Jílové minerály jsou krystalické (mimo allofanu) a mají vrstevnatou nebo řetězovou strukturu. Většinou mají tetraedry a oktaedry uspořádány vrstevnatě [1].

### 2.2.1.1 Jílové minerály

Nejdůležitějšími jílovými minerály jsou zejména skupiny:

- kaolinitu
- montmorillonitu
- illitu (hydroslíd)
- chloritu

#### skupina kaolinitu

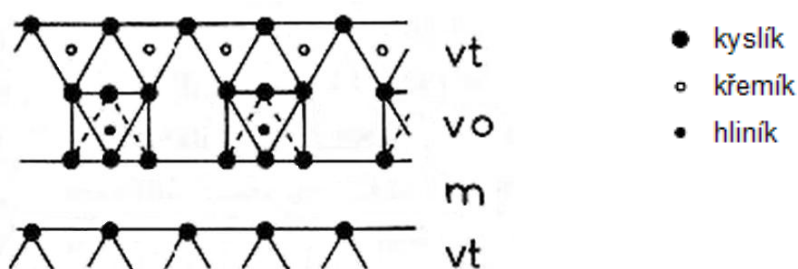
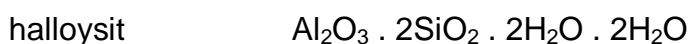
Jedná se o dvojvrstvé jílové minerály. Nejvýznamnějším zástupcem skupiny kaolinitu je minerál kaolinit, který vzniká nejčastěji zvětráváním a chemickou přeměnou živců. Tloušťka jeho dvojvrství je 0,7 nm (mezivrství 0,715 nm). Označuje se chemickým vzorcem:



Podle pravidelnosti uspořádání základních dvojvrství nad sebou se rozlišují dva krajní strukturní typy kaolinitu:

- triklinický (T) : velmi pravidelně uspořádané dvojvrství, dobře vyvinuté šestiboké lupínky, ostré hrany zrn, větší krystaly
- pseudomonoklinický (PM) : méně pravidelné než druhá skupina, tenké hůře ohraničené lupínky, vyšší plastičnost než T

Kromě kaolinitu tato skupina zahrnuje např.:



Obr. 1 Struktura kaolinitu



Legenda k obr. 1

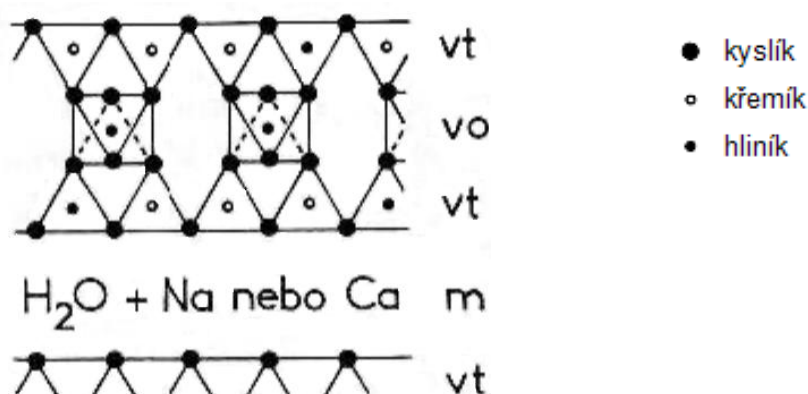
vt	vrstva tetraedrů kyslíku s atomem křemíku uprostřed
vo	vrstva oktaedrů kyslíku s atomem hliníku uprostřed,
m	mezivrstevní prostor

### skupina montmorillonitu

Skupina montmorillonitu obsahuje trojvrstvé jílové minerály. Mezi trojvrstvím jsou adsorbovány kationty (např.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  atd.) obklopené vrstvami vody. Díky této mezivrstvě se zvýší vzdálenost trojvrství, při zvýšené vlhkosti až o 2 nm (což vypovídá o značném bobtnání a velkém smrštění sušením).

Nejvýznamnější jílové minerály v této skupině jsou:

montmorillonit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
nontronit	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
beidellit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$



**Obr. 2** Struktura montmorillonitu

Legenda k obr. 2

vt	vrstva tetraedrů kyslíku s atomem křemíku uprostřed
vo	vrstva oktaedrů kyslíku s atomem hliníku uprostřed,
m	mezivrstevní prostor (u montmorillonitu do něho snadno vniká voda, což vyvolává bobtnání)

Montmorillonit a nontronit vznikají hlavně při zvětrávání vyvěřelých nebo přeměněných hornin. Beidellit se vyskytuje kromě jílu také ve spraších a slínech, často ve společnosti montmorillonitu.

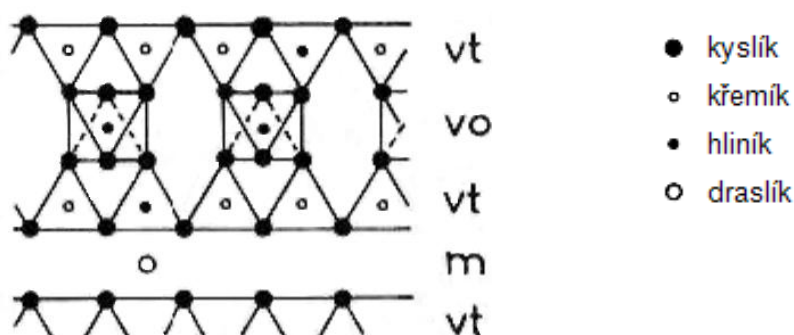
## skupina illitu

Jílové minerály ve skupině illitu jsou strukturně podobné minerálům ve skupině montmorillonitu a jsou také trojvrstvé. Liší se pouze tím, že větší množství křemíkových iontů v tetraedrech (přibližně 20 %), je v této skupině nahrazeno ionty hliníku. Elektronegativita, která by díky tomu vznikla, je vyrovnávána navázáním draslíku mezi základní trojvrství. Obvykle je extrémně jemnozrnný, jeho částice jsou menší než 1  $\mu\text{m}$  a často se vyskytuje ve směsi s dalšími jílovými minerály, hlavně s kaolinitem.

Protože v illitických minerálech draslík pevně poutá jednotlivá trojvrství, illit nebobtná. Velmi často se používá v cihlářských surovinách, protože má lepší plastičnost než kaolinit [2].

Nejvýznamnější jílové minerály v této skupině jsou:

illit	$n\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
hydromuskovit	$n\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3,5\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$



**Obr. 3** Struktura illitu

Legenda k obr. 3

vt	vrstva tetraedrů kyslíku s atomem křemíku uprostřed
vo	vrstva oktaedrů kyslíku s atomem hliníku uprostřed,
m	mezivrstevní prostor

## skupina chloritu

Chlority tvoří zpravidla lístkovitá nebo lištovitá zrna, lupenité agregáty či výplně mladších žilek nebo dutin a často tvoří alterační produkty jiných minerálů. Jsou to jílové minerály monoklinické.

Vyznačují se tím, že v Al - oktaedrech jsou všechna místa obsazena atomy Mg (případně méně často Fe nebo Ca). Jsou většinou zelené a tvoří chloritické břidlice. Často vznikají druhotně, tzv. chlorilizací, jež postihuje především feromagneziové minerály (zejména biotit).

Nejvýznamnějším jílovým minerálem v této skupině je:

chlorit  $10(\text{Mg, Fe})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

### 2.2.1.2 Keramická vazba

Keramická vazba je spojení, které vznikne mezi částicemi disperzní keramické suroviny při zvýšených teplotách - výpalu. Dodává keramickému výrobku potřebnou pevnost a přídržnost mezi zrna díky slinování. Vytváří se tak pevný hutný materiál, v němž jsou původně disperzní zrna suroviny pevně spojena.

Slinování je doprovázeno snižováním pórovitosti a tedy zvyšováním objemové hmotnosti. Nezřídka také objemovými změnami - smršťováním či nárůstem objemu. I když mohou při slinování vícesložkových systémů nastávat paralelní chemické změny, chápe se slinování jako proces fyzikální, který není chemickými ději podmíněn. Slinování probíhá buď za atmosférického tlaku, pak se jako jeho hlavní mechanismus uplatňuje difuze, nebo za tlaku zvýšeného (tlakové lisování), kdy je překročena mez kluzu (toku), takže se pak vedle difuze uplatňuje také makroskopický viskózní nebo plastický tok materiálu [3].

Podstatou keramického výpalu, kterým výrobek dostane konečnou podobu a vlastnosti je slinování určené pomocí stupně slinutí. Stupeň slinutí vyjadřuje poměr objemové hmotnosti  $\rho_v$  k měrné hmotnosti  $\rho$  vypáleného střepu a charakterizuje slinovací proces v závislosti na teplotě. Teplotou maximálního slinutí nazýváme teplotu s nejnižší nasákavostí. Zvyšováním teploty až do 1400 °C dochází k postupnému snižování pórovitosti (nejčastěji vyjádřené nasákavostí) a rozlišujeme několik intervalů a definovaných teplotních bodů. Dělí se na:

- interval zhutňování - teplota při 6 % nasákavosti se nazývá teplotou zhutnění
- interval slínání – je úsek mezi teplotou zhutnění a teplotou slinutí, která je charakterizovaná nasákavostí vypáleného střepu 2 % (výjimečně i 1 %)

- interval slinutí – je úsek mezi teplotou slinutí a teplotou tavení, kdy dochází k deformaci příslušné žároměrky. Tato teplota je také nazývána žárovzdorností.

Tato zkouška se provádí dle ČSN 72 1072 tak, že vypalujeme zkušební tělesa na různé teploty, podle typu zeminy a jejich předpokládaného využití, odstupňovaně po 100 °C. V blízkosti očekávané teploty slinutí se interval teplot sníží na 50 °C nebo 20 °C podle požadované přesnosti stanovení teploty slinutí. Výsledkem zkoušky je grafická závislost nasákavosti a objemové hmotnosti vypáleného střepu na vypalovací teplotě, z kterého se určí teplota zhutnění, teplota slinutí a teplota tavení [4].

Slínavost se definuje jako proces probíhající v tělesech či útvarech, skládajících se z více drobných, navzájem se dotýkajících částic, při zvýšených teplotách, avšak ještě pod teplotou tání, přičemž vzniká koherentní hmota. Děj je nevratný. Je spojený s poklesem obsahu energie systému v důsledku zmenšení vnitřního povrchu a náhrady energie na rozhraní tuhé a plynné fáze energií na rozhraní tuhých fází [5].

Slinování může probíhat více způsoby. Jedná se např. o povrchovou difúzi, difúzi po hranách zrn, objemovou difúzi, vypařováním a kondenzací, viskózním tečením a v přítomnosti nebo bez přítomnosti kapalné fáze. Lze ho rozdělit do těchto tří základních stádií:

- Stádium první se vyznačuje spojováním a slepováním částic, vznikem tzv. „krčků“ a hranic zrn. V tomto stádiu závisí smrštění na mechanismu, podle kterého proces probíhá nebo který převládá.
- Druhé stádium charakterizuje růst zrn a smršťování pórů
- Třetí stádium charakterizuje oddělování pórů.

Popsat přesnou formulací proces slinování v reálných keramických systémech, například v práškových kompozitech při slinování  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ , spinelů apod., je obvykle nemožné pro nedefinovatelnou geometrii každé částice a pro jejich polydisperzitu. Proto se poznatky o mechanismu a kinetice slinování aplikují s osobitým zřetelem na specifické požadavky každého materiálu. Složitým činitelem je též morfologie výchozích látek. Často se skládají z aglomerátů, které se v kompaktech po dobu slinování tváří jako samostatné útvary. Pro dosažení

rovnoměrné struktury, nízké pórovitosti nebo stavu bez jakýchkoli pórů jsou optimální monodisperzní a uniformní prášky.

Směsi, z kterých se ve výrobě staviv vytvářejí výlisky, jsou však vždy vysoce polydisperzní. Hrubozrnné frakce s velikostí až několik milimetrů jsou jako plnivo uloženy v drobnozrnné matici (zrna  $< 0,1$  mm), ve které probíhá slinování při vzniku konečné vazby. Její obsah a vlastnosti hlavně ovlivňují proces slinování a střep výrobku [6].

### 2.2.2 Neplastické suroviny

Neplastické suroviny se vyznačují tím, že po rozdělení s vodou nevzniká plastické těsto. Používají se jako příměsi do suroviny plastické. Podle funkce ve výrobku je možno je rozdělit na:

- a) ostřiva
- b) lehčiva
- c) taviva

Suroviny neplastické ovlivňují vlastnosti navržených směsí i výsledných výrobků a to svým množstevním zastoupením, granulometrií, tvarem částic, dále ovlivňují materiál v závislosti na technologii výroby, teplotě výpalu a dalším.

Neplastické suroviny mají vliv na keramické těsto po celou dobu výroby od přípravy směsi, míšení přes sušení až po výpal keramického výrobku. Působí svojí přítomností na množství rozdělovací vody do surového těsta, zpracovatelnost těsta při přípravě, rychlost a citlivost k sušení, výšku teploty výpalu, tepelně-izolační vlastnosti v závislosti na pórovitosti střepe, dále na objemovou hmotnost apod.

#### 2.2.2.1 Ostřiva

Ostřiva jsou organické nebo anorganické látky, které snižují plasticitu směsi (např. smrštění, citlivost k sušení aj.) a také mohou fungovat jako výplňová složka.

Ostřiva lze rozdělit podle chemické povahy na:

- speciální
- křemičitá
- hlinitokřemičitá.

Speciální ostřiva jsou především umělého charakteru a jsou navrhována pro speciální využití (jedná se především o mullit, korund, magnezitový slínek aj.) jako například požadavek na odolnost proti žáru, specifické elektrické vlastnosti, odolnost proti agresivnímu prostředí, otěruvzdornost apod.

Křemičitá ostřiva jsou založena na bázi oxidu křemičitého (s průměrnou čistotou nad 92 %), jako zdroj slouží krystalický křemen, křemenec (kvarcit), křemenný písek, křemelina aj. Vhodnou vlastností jílu je, pokud již obsahuje potřebné množství  $\text{SiO}_2$  v jemných frakcích.

Ostřivy hlinitokřemičitými se rozumí především šamot a tedy vypalované jíly nebo lupky. Specifická jsou tím, že již prošla vysokými teplotami, které těmto ostřivům poskytly tepelnou stabilizaci. Většinou tedy hlinitokřemičitá ostřiva obsahují větší či menší množství výhodného minerálu mullit ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , vysoká mechanická pevnost, odolnost proti vysokým teplotám, změnám teplot, odolnost proti kyselinám atd.)

#### 2.2.2.2 Lehčiva

Lehčiva, přidána do keramické směsi, slouží k vylehčení keramického střepu díky snížení jeho objemové hmotnosti. Obvykle se tím tedy zlepší i tepelně-izolační vlastnosti keramického výrobku v závislosti na zvýšení pórovitosti. Zvětšená pórovitost však kromě izolačních vlastností má za následek také snížení pevnosti. Lehčiva dělíme na:

- přímá
- nepřímá

Lehčiva přímá snižují objemovou hmotnost keramického střepu díky vyhoření organických složek při výpalu. Tím vznikne pórová struktura nahrazující lehčivo. Jako přímé lehčivo se používá zpravidla různých odpadních materiálů s co nejnižšími nároky na ekonomické hledisko např. dřevěné piliny, různé druhy drtí, uhelný prach, papírenské kaly aj.

Nejpoužívanějším přímým lehčivem jsou pro svojí snadnou ekonomickou dostupnost dřevěné piliny či dřevěná drť (v současné době - k roku 2012, stojí 1  $\text{m}^3$  pilin přibližně 300 Kč, 1  $\text{m}^3$  dřevěných štěpek cca 400 Kč). Jejichž cena však, stejně jako ceny ostatních druhotných surovin, v posledních letech, především

díky nižšímu množství na trhu, výrazně stoupla. Optimální volbou jsou tvrdší dřeva s nižším obsahem celulózy (dub, buk, kaštan, višň, třešeň, ořech, aj.).

Použití pilin jako lehčiva je vhodné zejména při technologii vytváření z plastického těsta. Ve většině případů nejvyšší možný obsah pilin vložitelný do střepu je 25-30 %. Již po dosažení této hodnoty se směs obtížně zpracovává a klesá vaznost, především díky dobrému modulu pružnosti dřeva (10 000 - 15000 MPa), vysoké nasákavosti, bobtnání, smrštění atd. [7]

Piliny by se pro zachování konstantní kvality výroby měly do směsi vkládat po vysušení.

Lehčiva nepřímá snižují objemovou hmotnost keramického materiálu vlivem svojí vlastní nízké objemové hmotnosti a zůstávají přítomny ve střepu i po výpalu. Jedná se například o cenosféry, křemelinu atd. Existují i nepřímá lehčiva syntetického charakteru jako např. expandovaný perlit aj.

V současné době je trendem používat jako lehčiva odpady či druhotné suroviny, díky čemuž je výroba keramického střepu ekologičtější a levnější.

### 2.2.2.3 Taviva

Taviva umožňují snížit teplotu výpalu a zlepšují tvorbu taveniny. Slinování střepu tak nastane při relativně nízké teplotě a dojde ke snížení nákladů na výrobu, protože výpal lze označit za ekonomicky nejnáročnější proces výroby keramického střepu. Použitím taviv lze získat střep o stejné pórovitosti při nižší teplotě výpalu. Nejčastěji využívanými tavivy základními jsou živce – draselné, sodnodraselné, sodné, a vápenaté. Pro tavicí účinek je důležitý obsah alkalických oxidů, především  $\text{Na}_2\text{O}$  a  $\text{K}_2\text{O}$ .

Taviva lze obecně rozdělit na:

- základní (dělí se na taviva přírodní - živce a uměle vyrobená - frity)
- eutektická (nízkotavitelné sloučeniny díky reakci oxidů)

Živci nazýváme bezvodé alkalicko-hlinité, případně vápenato-hlinité křemičitany. Zdroje upotřebitelných živců jsou však relativně vzácné. Omezené množství zásob čistých živců vyžaduje používání surovin s nižším obsahem živcové složky, zřejmě i proto, že je lze do směsi vnášet s minerály, které je

doprovázejí - jako např. křemenem. Používají se živcové pegmatity, odpady z plavení kaolinu, nebo například žula či odprašky z jejího zpracování. [8]

Frita je uměle vyrobené tavivo získané roztavením suroviny a prudkým zchlazením vzniklé taveniny ve vodě. Vyrábí se z například ze sody, potaše, sádrovce apod. a křemenného písku. Výsledkem je granulované sklo, které se mele buď samotné, nebo dohromady s barvítka či jinými přísadami. Používají se především při výrobě glazur.

Eutektická taviva jsou suroviny obsahující některý z tzv. tavicích oxidů - CaO, MgO, FeO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O. Jednotlivé složky mezi sebou vzájemně reagují při nižší teplotě, než je teplota tání jednotlivých složek. Eutektickou teplotu a vznik taveniny v soustavě různých oxidů lze určit z fázových diagramů.

## 2.3 Rozdělení jílu

Definice materiálu jíl ukazuje na přírodní charakter jílu, a tedy vylučuje obsah syntetických materiálů. Na základě standardní definice jsou jíly primárně anorganické materiály (vyjma rašeliny, mrvy a některých půd), které obsahují velké množství organického materiálu.

Jíly jsou nezpevněné sedimentární horniny obsahující jako většinou složku především jemnozrnné jílové minerály (jílové minerály jsou takové minerály, které propůjčují hmotě plastické vlastnosti a tvrdnou při vysušení a výpalu - viz kapitola 2.2.1), zejména skupiny kaolinitu, montmorillonitu, illitu, chloritu a další. Tyto jsou tvořeny více než z poloviny z jílovinových částic s velikostí zrn menších než 2  $\mu\text{m}$ . Výraz "jemnozrnný" však nelze vyčíslit přesně, jelikož specifická velikost částic není všeobecně uznávána všemi obory. Obecně se však většina geologů a půdních specialistů shodla na definici jemnozrnných částic v hodnotě menší než 2 mikrometry. Sedimentologové pro definování velikosti jemnozrnných jílových částic používají rozměr 4 mikrometry a definice koloidních chemiků může být odlišná též [9].

Stejně tak výraz plasticita (jako vlastnost) postrádá nutnost přesně vyčíslené hodnoty - hovoří se buď o materiálu plastickém či neplastickém. Výraz "plasticita" představuje vlastnost materiálu, díky které může být formován do jakéhokoli tvaru. Je to vlastnost výrazně ovlivněná chemickým složením materiálu.



Například některé jíly s obsahem chloritů a slíd mohou zůstat zcela neplastické, přestože obsahují více jak 70 % částic menších než 2 mikrometry SD (sférický průměr). Naproti tomu jiné jíly s obsahem chloritů a slídy se stávají plastickými, i když obsah částic menších jak 2 mikrometry jsou jen například 3 % materiálu.

Jednotlivé druhy jílu se od sebe liší fyzikálně-mechanickými i fyzikálně-chemickými vlastnostmi podle způsobu svého vzniku a především podle svého složení. Při hodnocení jejich kvality je brán zřetel především na pevnosti vypálených keramických jílu, žárovzdorné vlastnosti, izolační vlastnosti a v neposlední řadě také na cenu.

Podle způsobu použití a technologických vlastností se v České Republice jíly dělí na:

- žárovzdorné vazné
- žárovzdorné pórovinové
- keramické nežárovzdorné
- kameninové
- těsnící
- jiné [10]

Podle zastoupení jílových minerálů jsou jíly děleny na:

- monominerální - kaolinitové, illitové a další
- polyminerální - složené z více jílových minerálů

Jíly kromě jílových minerálů obsahují také příměsi. Jedná se především o křemen, živce, slídy, karbonáty, organické činitele, oxidy a hydroxidy železa, kovy a další prvky. Jíly se liší také barvou právě díky různému druhu a obsahu příměsí - černé, bílé, šedé, žluté, hnědé, namodralé a ostatní.

Podle celistvosti jsou jíly děleny na:

- nezpevněné - jíly
- zpevněné - jílovce
- nemetamorfne rekrystalizované - jílovité břidlice

### 2.3.1 Zásoby a ceny jílu v ČR

- **kladensko-rakovnický permokarbon** - vyskytují se především vysoce žárovzdorné jílovce, které se používají pro výrobu žárovzdorných ostřív. Méně jsou zastoupeny také červeně se pálicí dlaždicové jíly a šedé nežárovzdorné jílovce. Nejdůležitějšími oblastními ložisky žárovzdorných jílu jsou Rynholec-Hořkovec 2 a Rakovník.

- **moravská a východočeská křída** - jedná se o oblast s největšími zásobami žárovzdorného jílu se stejným použitím jako u předchozí oblast (s mírně horší jakostní skladbou). V současnosti je nejvýznamnějším těžebním místem ložisko Březinka.

- **lounská křída** - jíly z této oblasti jsou vhodné jako pórovinové a žárovzdorné, ale hlavně jako keramické nežárovzdorné. V současnosti je těženo jen středně velké ložisko Líšťany.

- **křída v okolí Prahy** - jíly jsou vhodné jako vysoce žárovzdorné na ostřívo, žárovzdorné vazné i jako pórovinové. Nejvýznamnější využívaná ložiska jsou Vyšehořovice a Braník.

- **jihočeské pánve** - jíly jsou vysoce až středně žárovzdorné zejména vhodné jako vazné, dále i jako pórovinové a nežárovzdorné. Hlavními ložisky vazných jílu jsou Borovany-Ledenice, kde se zároveň těží i diatomit a Zahájí - Blaná. Jihočeská pánev leží mezi Českými Budějovicemi a Strakonice. V pánvi jsou ložiska jílu, lignitu (Mydlovary) a diatomitu.

- **plzeňská pánev a terciérní relikt středních a západních Čech** - převládají středně žárovzdorné jíly, které jsou vyhodnoceny jako vazné a keramické pro výrobu dlaždic a obkládaček, ale i kameniny. Nejdůležitější těžené velké ložisko vazných jílu jsou Kyšice-Ejpovice.

- **chebská a sokolovská pánev** - mnohem důležitější je chebská pánev, kde jsou významné vazné jíly, pórovinové, žárovzdorné a kameninové. Rozhodujícím těženým ložiskem vazných jílu je Nová Ves 2 u Skalné.

- **severočeská a žitavská pánev** - mimo hliníkových podložních jílu se zde vyskytují i nadložní keramické (kameninové) jíly. V současnosti je těženo jen středně velké ložisko kameninového jílu Tvršice v severočeské pánvi.

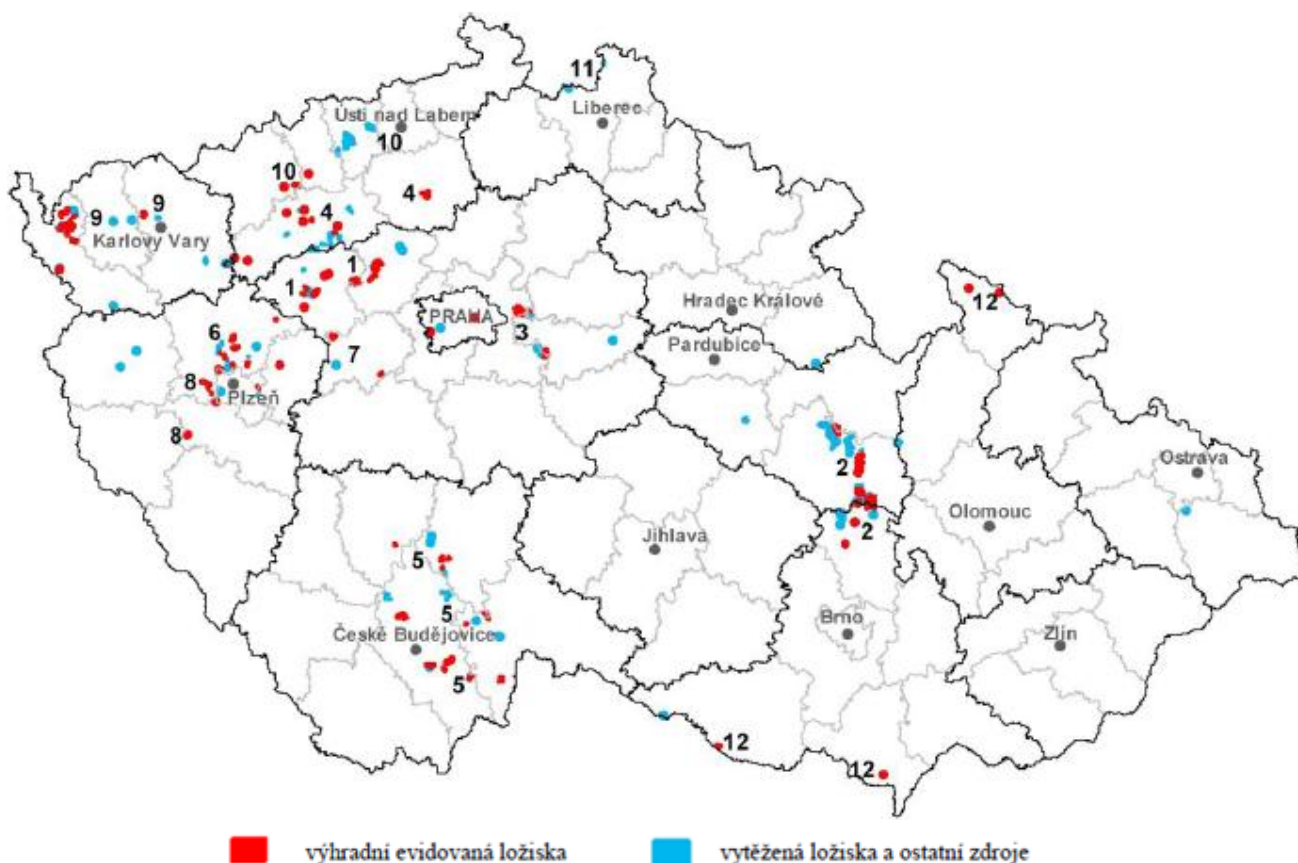
- **terciér a kvartér na Moravě** - vyskytují se zde keramické (především kameninové a dlaždicové) jíly - Poštorná, Šatov. [5]

**Tab. 1** Počet ložisek, zásoby a těžba v ČR

		Rok				
		2006	2007	2008	2009	2010
Počet ložisek v ČR [ks]	celkem	110	106	106	106	108
	těžené	22	21	19	18	18
Zásoby v ČR [kt]	celkem	944 607	927 520	927 639	925 714	924 112
	prozkoumané	188 102	185 168	179 551	180 311	180 945
	vyhledané	411 630	394 645	397 614	402 944	401 419
	nebilanční	344 875	345 707	350 474	342 459	341 748
Těženo [kt]	celkem	561	679	574	377	429

**Tab. 2** Obchodování s jíly

			Rok				
			2006	2007	2008	2009	2010
Žárovzdorné jíly	Obchodované množství [t]	Import	18 087	23 275	14 171	9 459	12 332
		Export	36 623	31 830	30 666	20 996	22 361
	Průměrná cena [kč/t]	Import	1 896	1 932	2 250	3 024	3 092
		Export	1 249	1 331	1 183	1 294	1 226
Ostatní jíly	Obchodované množství [t]	Import	17 655	14 055	16 478	4 840	12 667
		Export	8 940	11 405	11 098	50 494	51 453
	Průměrná cena [kč/t]	Import	1 985	3 038	1 995	4 334	1 759
		Export	1 815	2 237	2 096	857	916



**Obr. 4** Ložiska jílů a žárovzdorných jílů v ČR (převzato z geofond.cz)

**Tab. 3** Legenda k obr. 4

1	kladensko-rakovnický karbon	7	terciér středních Čech
2	moravská a východočeská křída	8	terciér západních Čech
3	křída v okolí Prahy	9	chebská a sokolovská pánev
4	lounská křída	10	severočeská pánev
5	jihocheská pánev	11	žitavská pánev
6	plzeňská pánev	12	terciér a kvartér na Moravě

Z tabulky 2 je patrné, že obchodované množství žárovzdorných jílů v období finanční krize (rok cca 2009) proti předchozím letem silně pokleslo, zatímco obchodování s ostatními jíly se s rokem 2009 výrazně zvýšilo. Cena žárovzdorných jílů osciluje. Exportní cena se od roku 2006 zásadně nezvýšila, naopak cena dovážených žárovzdorných jílů se za 5 let od roku 2006 zvýšila téměř o 40 %. Ceny ostatních jílů se naopak snížily.

## 2. 4 Žárovzdorné materiály

Žárovzdorné materiály jsou anorganické nekovové materiály, jejichž žárovzdornost je minimálně 1500 °C. Mikrostruktura je většinou tvořena velkými zrny (hrubá keramika) a základem střepu je hrubozrnné ostřivo propojené jemnou hmotou. Žárovzdorné materiály se nejvíce používají jako vyzdívkové materiály pro pece a tepelné agregáty.

Obsahově největší množství vyráběných žáromateriálů je založeno na podstatě  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ . Je to díky snadné dostupnosti těchto surovin, ale také díky malé měrné tepelné vodivosti materiálů.

Mimo těchto oxidů se vyskytují v přírodě hojně také suroviny s obsahem  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  a méně žádoucími jako je  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  a další. Pro žáromateriály jsou nežádoucími proto, že ve většině případů snižují jejich klasifikační teplotu.

Dalším případem jsou pak materiály na bázi  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  a dalších oxidů s vysokou žárovzdorností, nitridů, boridů, uhlíkových žáromateriálů, karbidů aj. Tyto žáromateriály jsou používány pro speciální účely pro jejich ekonomickou náročnost a vyšší ceně oproti šamotu, dinasu apod. [11]

### Význam nejdůležitějších oxidů

$\text{SiO}_2$  – vyskytuje se ve formě křemene, křemičitanů, křemičitých písků apod. Snižuje citlivost k sušení ostřením, tzn. také snižuje smrštění sušením. Dále zvyšuje kyselinovzdornost. Nevýhodou je snížení mechanických pevností. Podílí se na tvorbě mullitu. Základní oxid pro výrobu dinasu.

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – druhý hlavní oxid v žárovzdorné keramice, zlepšuje plasticitu, po výpalu umožňuje vznik jednoho z nejdůležitějších žárovzdorných minerálů mullitu. Zvyšuje citlivost k sušení, pálení a smrštění. Zvyšuje teplotu tavení.

$\text{TiO}_2$  – bývá přítomen v keramice ve formě minerálů rutil, anatas a titanit. Vystupuje jako tavivo (snižuje žárovzdornost - nevhodné) a při velkém množství funguje též jako barvivo (tzv. titanová běloba)

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  – vyskytuje se ve formě hnědele, krevele a limonitu, případně pyritu, magnezitu či parkazitu, Působí jako tavivo. V žáromateriálech funguje jako nepříznivá složka. Při redukční atmosféře uniká kyslík a nadouvá keramický střep.

$\text{CaO}$  – snižuje odolnost proti působení kyselin, v určitých případech funguje jako eutektické tavivo (nepříznivé).

$\text{MgO}$  – základní prvek pro výrobu žáromateriálu Magnezit. Může způsobovat při větším množství velké smrštění pálením. Nad  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  může v určitých případech působit jako tavivo.

$\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  – působí jako velmi účinná taviva. Proto jsou v žáromateriálech nechtěné.

### 2.4.1 Rozdělení žárovzdorných materiálů

Žárovzdorné materiály lze rozdělit podle různých parametrů a vlastností. Lze je primárně rozdělit podle funkce:

- hutné (skutečná pórovitost  $< 45\%$ )
- izolační (skutečná pórovitost  $> 45\%$ )

Dělí se také podle tvaru:

- tvarové žáromateriály - mají jasně daný tvar a konečnou strukturu výrobků ještě před zabudováním, kde samostatný výrobek či výrobků utvoří celek. Jedná se o cihly, tvarovky atd.
- netvarové žáromateriály - žárovzdorné betony a výrobky, u kterých není předem daný tvar, jsou většinou v zrnité formě a výpal těchto materiálů proběhne až po zabudování do konstrukce.

Dále lze dělit podle žárovzdornosti na:

- žárovzdorné (žárovzdornost menší než  $1770\text{ }^\circ\text{C}$ )
- velmi žárovzdorné ( $1770 - 2000\text{ }^\circ\text{C}$ )
- vysoce žárovzdorné (žárovzdornost větší než  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ )

Také se dělí podle základní fáze na:

- oxidické - založeny na bázi oxidů a jejich sloučenin ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  aj.)
- neoxidické - žáromateriály založené na jiné podstatě než oxidické, jako např. karbidy, nitridy, boridy nebo silicidy
- uhlíkové - žáromateriály obsahující grafit, který zlepšuje odolnost proti náhlým změnám teploty, odolnost proti korozi aj.

Rozdělit je lze také podle chemického charakteru na:

- zásadité - hlavní fází je  $\text{CaO}$  či  $\text{MgO}$  (magnezit, dolomit aj.)
- kyselé - hlavní fáze je  $\text{SiO}_2$  (kyselý šamot, dinas, aj.)
- neutrální - jako hlavní fázi neobsahují  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  ani  $\text{SiO}_2$  (jsou to uhlíkové žáromateriály, šamot, mullit, korund atd.)

Podle typu tepelného zpracování:

- výrobky pálené
- výrobky nepálené (vypalované až po jejich zabudování či pojené jinou než keramickou vazbou)
- výrobky žárolisované (vylisované za tepla ve zvláštním lisu)
- výrobky tavené (surovina se taví a odlévá do forem)

Norma ČSN EN ISO 10081 dále rozlišuje žáromateriály tvarové na:

- hlinitokřemičité
- zásadité s obsahem uhlíku do 7 %
- zásadité s obsahem uhlíku od 7 % do 50 %
- zvláštní

Žáromateriály netvarové pak na:

- žárobetony
- torkretovací materiál
- tvarovatelný materiál
- žárovzdorná malta
- materiály ostatní

## 2.4.2 Klasifikace žáromateriálů

### Hutné žáromateriály

- Hlinitokřemičité žárovzdorné materiály se v současné době (rok 2012) třídí podle ČSN EN ISO 10081-1 z 1. října 2005. Tato norma nahrazuje normu ČSN EN 12475-1 (či ČSN 72 6014) z 1. ledna roku 1999
- Zásadité výrobky obsahující méně než 7 % zbytkového uhlíku se klasifikují podle normy ČSN EN ISO 10081-2
- Zásadité výrobky obsahující 7 % až 50 % zbytkového uhlíku se klasifikují podle normy ČSN EN ISO 10081-3
- Zvláštní výrobky se klasifikují dle ČSN EN 12475-4 z 1. 10. 1999

### Izolační žáromateriály

- Tvarové žárovzdorné materiály izolační se klasifikují podle ČSN EN 1094-2 z 1. července 1999, která nahradila normu ČSN ISO 2245 (72 6012) z prosince 1993 a ČSN 72 6002
- Vlákenné žárovzdorné materiály izolační se klasifikují podle ČSN EN 1094-1, která nahradila ČSN EN 1094-3 (72 6080) z ledna 2004

#### 2.4.2.1 Klasifikace žáromateriálů izolačních tvarových dle EN

Klasifikace žáromateriálů izolačních tvarových probíhá, viz výše, dle normy ČSN EN 1094-2. Tato norma cituje také normy EN 1094-1, EN 1094-3, EN 1094-4, EN 1094-5, EN 1094-6 a EN 1094-7. Norma stanovuje klasifikaci na základě stanovení trvalých délkových změn v žáru a obsahuje druhotné třídění na základě objemové hmotnosti s ohledem na žárovzdorné výrobky s vyšší pórovitostí (třída L).

Žárovzdorné výrobky tvarové izolační se dělí do skupin podle:

- a) Teploty, při níž trvalé délkové změny v žáru, stanovené podle EN 1094-6, činí 2 % anebo méně (viz tabulka 4)
- b) Objemové hmotnosti stanovené dle EN 1094-4, zaokrouhlené na 2 des. místa, pro rozlišení výrobků třídy L s vyšší pórovitostí (viz tabulka 5)



Označování žárovzdorných izolačních výrobků vypadá následovně:

- údaj o skupině, do které náleží
- údaj o objemové hmotnosti
- údaj o příslušnosti do skupiny L (pokud do ní náleží)

Např.

Žárovzdorný výrobek izolační podle EN 1094-2, skupina (85), objemová hmotnost (0,55) a jelikož splňuje podmínky, třída (L) ke které náleží

EN 1094 - 2 - 85 - 0,55 - L

Jako žárovzdorné výrobky tvarové izolační se berou ty výrobky, které mají skutečnou pórovitost stanovenou podle EN 1094 - 4 ne menší než 45 % (objemově) [12]

**Tab. 4** Klasifikace podle teploty

Skupina	Teplota při které se provede zkouška trvalých délkových změn v žáru [°C]
75	750
80	800
85	850
90	900
95	950
100	1000
105	1050
110	1100
115	1150
120	1200
125	1250
130	1300
135	1350
140	1400
150	1500
160	1600
170	1700
180	1800

**Tab. 5** Klasifikace podle objemové hmotnosti

Skupina	Horní hranice průměrné objemové hmotnosti pro výrobky třídy L [g/cm <sup>3</sup> ]
75	0,40
80	0,50
85	0,55
90	0,60
95	0,65
100	0,65
105	0,65
110	0,70
115	0,70
120	0,70
125	0,75
130	0,80
135	0,85
140	0,90
150	0,95
160	1,15
170	1,35
180	1,60

#### 2.4.2.2 Klasifikace žáromateriálů izolačních tvarových dle ASTM

Americká norma ASTM klasifikuje žárovzdorné izolační materiály podle normy ASTM C155 - Classification of shaped heat-insulating refractory products

Klasifikace žáromateriálů podle americké normy ASTM je v tabulce 6. Klasifikuje se buď ve stupních Celsia, nebo ve stupních Fahrenheita. Tato norma klasifikuje izolační žáromateriály do skupin tak, aby se výrobcům i spotřebitelům dostalo jasného odlišení.

Číslo dané označením skupiny neurčuje přímo maximální teplotu použití, ačkoli vynásobením 100x se hodnotě maximální teploty, kdy ještě nedojde k větším rozměrovým změnám než 2 %, přibližuje (ve stupních Fahrenheita). Může tak sloužit jako pomůcka pro určení relativní teplotní stability. Objemová hmotnost je určena pro každou stanovovanou skupinu, nemá však sloužit pro detailní stavební výpočty.

**Tab. 6** Klasifikace dle ASTM C 155

Skupina	Klasifikační teplota, při které po 24 hodinách nedojde k většímu nevratnému délkovému přetvoření než 2%		Objemová hmotnost menší než g/cm <sup>3</sup>
	°F	°C	
16	1550	845	0,54
20	1950	1070	0,54
23	2250	1230	0,77
26	2550	1400	0,87
28	2750	1510	0,96
30	2950	1620	1,09
32	3150	1730	1,52
33	3250	1790	1,52

### 2.4.3 Technologie výroby izolačních žáromateriálů

Vylehčením hutného keramického střepu lze docílit vyšší pórovitost materiálu. Tato vlastnost je přímo závislá na součiniteli tepelné vodivosti. Tímto způsobem lze zlepšit tepelně-izolační vlastnosti žáromateriálů, obvykle však za cenu velkého snížení mechanické pevnosti. Nejběžněji používanými metodami vylehčení jsou:

- přidavek vyhořívajících materiálů
- přidavek plniva s nízkou objemovou hmotností
- napěnění
- chemická reakce za vývinu plynu
- přidavek těkavých látek
- kombinace uvedeného

#### 2.4.3.1 Technologie výroby přidavkem vyhořívajících materiálů

Vyhořívání je v podstatě chemická reakce mezi kyslíkem a uhlíkatou látkou, která probíhá za vysoké teploty a přítomnosti inertního materiálu (keramické hmoty). Vliv na tento proces má tloušťka výrobku, pórovitost a propustnost pro plyny, druh, množství a rozměry částic vyhořívajících příměsí, režim výpalu a vzdálenost mezi výrobky ve vsázce.

Vylehčování pomocí technologie vyhořívajících příměsí je jedna z nejčastěji používaných metod výroby izolačních žáromateriálů. Při této technologii dochází k vyhoření příměsí, jako je mleté či drcené uhlí, dřevěné piliny, různé druhy drtí a jiné snadno spalitelné odpadní materiály. U lehčení vyhořívajícím příměsemi je velice rozšířené použití pilin nebo dřevěných odpadů, zejména z tvrdých dřevin. Piliny však snadno přijímají vlhkost a bobtnají, což vede k nerovnoměrnému smršťování a deformaci výrobků. Pro vytváření lisováním ze zavlhle směsi jsou dřevěná lehčiva málo vhodná kvůli své vysoké pružnosti.

Vhodné je použít vyhořívající lehčiva s malým a nejlépe žádným obsahem popeloviny. Vliv na kvalitu vylehčovaného materiálu má jak množství, tak složení popeloviny. Nežádoucí zbytky v popelovině jsou oxidy alkalických kovů, železa a oxidy kovů alkalických zemin. Málo škodlivými prvky jsou takové oxidy, které obsahuje i samotný střep.

Přidavky přiměsí se obvykle pohybují od 15 do 50 %. Dalším zvyšováním již nedochází k růstu pórovitosti, ale prudce klesá mechanická pevnost [6].

#### **2.4.3.2 Technologie výroby přidavkem plniva s nízkou objemovou hmotností**

Technologie výroby izolačních žáromateriálů přidáním plniva s nízkou objemovou hmotností nepatří mezi technologie nejpoužívanější. Použití této technologie se uplatní především pro přípravu netvarových žáromateriálů. Jako lehčené plnivo se obvykle používá expandovaný perlit, dutý kuličkový korund a duté kuličky na bázi  $\text{SiO}_2$  .  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ale též drť z lehčeného šamotu apod. Jako pojiva se nejčastěji používají jíly a směsi jílu s oxidem hlinitým. [13]

Často se používá např. expandovaný perlit, který má velmi malé sypané hmotnosti. Surovinou pro přípravu expandovaného perlitu jsou kyselé vulkanické horniny s charakteristicky vázanou vodou.

Další často používané lehčivo s vynikajícími žárovými vlastnostmi je dutý kuličkový korund. Surovinou je kvalitní oxid hlinitý s velmi malým obsahem oxidů železa [14].

#### **2.4.3.3 Technologie výroby napěněním**

Podstata této technologie je založena na smíchání pěnotvorné přísady nebo hotové pěny se suspenzí žárovzdorného jílu. Pěna je vytvořena šleháním či rychlým mícháním povrchově aktivní látky. Problémem je však stabilita bublin takovéto pěny. Tento problém lze zmenšit použitím polokoloidních látek jako je mýdlo, mycí prostředky (jar, pur apod.), saponáty, látky bílkovinné podstaty aj. Saponátové bublinky jsou velmi stabilní, ale tvoří tlustší stěny bublin. Pro vyšší stabilitu pěny se dále používají stabilizátory - sulfitový louh, želatina, truhlářský klič atd.

Při smísení pěny s keramickými částicemi dojde k tzv. mineralizaci pěny, a tedy adsorbování pevných částic k blankám systému. Přídržná síla a rychlost a objem nalepování jsou potom určeny povrchovými silami tuhé fáze a povrchovou aktivitou látky. Jemnější částice se drží pevněji než hrubé, proto je velice podstatná jemnost mletí.

Důležitou etapou výroby izolačních žáromateriálů touto technologií je sušení, na jehož délku mají vliv konzistence a vlhkost směsi. Vlhkost může unikat z výrobku pouze jednou plochou, proto jsou podmínky difuze kapalin nevhodné a sušení trvá dlouho. Vyskytují se potíže při sušení a velké smršťování dosahuje až 50 %, což použití této technologie omezuje. Napěnění umožňuje získávat výrobky s vysokou pórovitostí až 90 % a výrobky připravené tímto způsobem, mají podstatně vyšší pevnosti. Jejich nevýhodou je složitost technologického procesu a nutnost jemného mletí.[15]

#### **2.4.3.4 Technologie výroby vývinem plynů**

Podstata této technologie je založena na vylehčení materiálu plynem, který vznikne při chemické reakci v materiálu již obsažených nebo uměle dodaných příměsí. Ten z hmoty následně uniká a zanechá po sobě pórovou strukturu. Největším problémem je rovnoměrně rozšířit, promíchat a stabilizovat bublinkovou strukturu.

Chemické reakce vzniku plyné fáze pro vylehčení touto technologií lze rozdělit na:

- reakce mezi karbonáty a kyselinami při uvolňování  $\text{CO}_2$
- reakce mezi kovy (Al, Ca, Mg, Zn aj.) a kyselinami nebo zásadami při vzniku  $\text{H}_2$
- reakce mezi zásadami, kyselinami a solemi při vývinu plyné komponenty
- reakce mezi organickými sloučeninami při vývinu doprovodných plynů
- oxidace nebo rozklady probíhající v taveninách
- tepelné rozklady karbonátů, peroxidů, siloxanů apod. [15]

Často používanou reakcí při vyrábění šamotů je reakce mezi kovy a zásadami s přídavkem Al za vzniku vodíku. Lze využít též reakce kovového hliníku s vodou. Někdy se také používá kombinace více metod.

#### **2.4.3.5 Technologie výroby přídavkem těkavých látek**

Podstata této technologie výroby je založena na přidání těkavé látky, obvykle organické, které se za vyšší teploty odpařuje a zanechá po sobě v látce pórovitou strukturu. Proces probíhá obdobně jako při použití vyhořívajících přísad,

ale v tomto případě nejprve vytěká téměř celé množství přidané látky, která obvykle shoří mimo výrobek.

Těkávé látky se obvykle rozkládají a těkají při mírně zvýšených teplotách a při výpalu se musí používat asanační zařízení. V něm se produkty rozkladu následně spálí.

Používají se látky jako polystyren, parafín, naftalen a jiné. [15]

#### **2.4.3.6 Technologie výroby kombinováním různých způsobů**

Je zřejmé, že v některých případech je cestou k optimálnímu vylehčení (a tedy dobrým tepelně izolačním vlastnostem) kombinace některých výše zmíněných metod. Velmi často se jedná především o kombinaci technologie přídavku vyhořívajících přísad s technologiemi ostatními. V případech, kde jednotlivé technologie nevedou k požadovaným vlastnostem výrobků, je kombinace technologií často překvapivě dobrou možností. Cílem je získat především vysoké mechanické pevnosti, vysokou pórovitost, nízkou objemovou hmotnost atd.

K výrobě lehčených žáromateriálů se nejčastěji používají běžné technologie pro výrobu šamotů či vysocehlinitých materiálů, tzn. vytváření z plastického těsta či technologie lisování ze zavlhlé směsi tzv. drolenky. Již méně často je k vidění lití ze suspenze.

#### **2.4.4 Použití izolačních žáromateriálů**

Žárovzdorné izolační výrobky jsou většinou instalovány do sekundární vnější vrstvy vyzdívek pecí. Nevykazují vhodnost do pracovní vrstvy vyzdívek pro malou odolnost proti náhlým změnám teplot a tečení a kvůli nepříliš vysokým pevnostem.

Kladnou vlastností vyzdívek z žárovzdorných izolačních materiálů je finanční příznivost díky nižší spotřebě energií. Dalšími klady je nižší hmotnost tepelného agregátu jako celku (u izolačních materiálů se obecně předpokládá nižší objemová hmotnost) a v neposlední řadě také podpora stejnorodosti teplotního pole v peci. Pro bezpečnost výroby a provozu jsou izolační žáromateriály nenahraditelné.

Izolační žáromateriály se obecně používají všude, kde se k provozu používají pece a ve stavebnictví se jedná především o:

- výrobu keramiky
- výrobu cementu a vápna
- hutnictví
- slévárenství
- sklářském průmyslu aj.

Všechny vrstvy vyzdívky jsou důležitou částí tepelných agregátů, jelikož mají zásadní vliv na trvanlivost, ale také na ekonomickou stránku výroby (pořizovací cena, provozní cena).

U žárovzdorných izolačních vyzdívek je vyžadována:

- finanční výhodnost (pro nákup i provoz)
- optimální využití všech materiálů
- odolnost proti teplotnímu gradientu při zachování stability
- dobrá trvanlivost

Mezi nejpoužívanější žáromateriály patří: šamot, dinas, magnezit, korund, karbid křemíku, uhlíkové žáromateriály aj. Tyto lze následně dále vylehčovat pro tepelně - izolační využití.

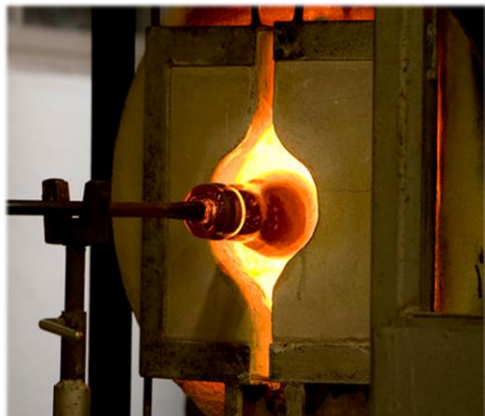
- a) Šamot – po chemické stránce se prezentuje vysokým obsahem  $\text{SiO}_2$  (>93 %) a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (<45 %). Hlavní složkou jsou žárovzdorné hlíny a jíly a povětšinou také šamotové ostřívo získané výpalem žárovzdorných jílovců nebo lupků. Vypaluje se obvykle při teplotách 1000-1400 °C. Jedná se o nejjednodušší a nejpoužívanější žáromateriál všeobecně. Vyznačuje se relativně dobrou pevností, odolností proti změnám teploty, tepelnou izolačností aj.
- b) Dinas – vyrábí se z tmelových nebo krystalických křemenců (přítomnost  $\text{Al}_2\text{O}_3$  není vítána), ke kterým se přidává vápenné mléko (asi 2 %  $\text{CaO}$  nebo 3 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), jež působí jako mineralizátory přeměny modifikací  $\text{SiO}_2$ . Dělí se na sklářský a koksárenský. Směs se tváří lisováním za sucha tlakem 30

- 50 MPa. Střep obsahuje cristobalit, tridymit a většinou též určité množství  $\beta$  - křemene. Výpal probíhá dlouhou dobu, tj. 200 – 300 hodin, aby kvalitně proběhly všechny modifikační přeměny  $\text{SiO}_2$ . Je velmi vhodný pro žáromateriály trvale pracující při teplotě vyšší než 600 °C.
- c) Magnezit – vyznačuje se vysokým obsahem  $\text{MgO}$  (>80 %), zbytek tvoří oxidy  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Surovinou mu jsou  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{MgO}$  z mořské vody a  $\text{MgCl}_2$ . Má vysokou únosnost v žáru (1600 - 1670 °C), ale malou odolnost proti náhlým změnám teploty. Lze ho také upravit do podoby tzv. chrommagnezitu, který má ještě lepší vlastnosti (rozměrová stálost, vyšší pevnost v žáru aj.), ale také vyšší cenu.
- d) Korund – hlavní surovinou pro výrobu korundu je  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (bauxit), jehož obsah v korundu je větší než 95 %. Je objemově velmi stálý i za vysokých teplot. Na Mohsově stupnici tvrdosti dosahuje hodnoty 9.
- e) Karbid křemíku – výroba ze směsi křemene, koksu a dřevěných pilin (5-10 %) v odporové elektrické peci při teplotě okolo 2200 °C. V chemickém průmyslu základní hmota pro výrobu brusiv.  $\text{SiC}$  je velmi tvrdý (>9 na Mohsově stupnici tvrdosti), žárovzdorný a má malou teplotní roztažnost. Jako pojivo pro jeho výrobu se používá jíla, vodní sklo či sulfitové výluhy. Má výbornou odolnost proti změnám teploty (cca 5-10x vyšší než jiné žárovzdorné materiály).
- f) Uhlíkové žáromateriály – jsou vypalované při relativně nízkých teplotách (< 800 °C). Pro výrobu se používají grafit (20 – 50 %) a žárovzdorný jíla. Vypaluje se v redukční atmosféře. Mají dobrou odolnost proti náhlým změnám teploty a odolnost proti korozi.

Kromě těchto významných žárovzdorných tvarových materiálů existují ještě tzv. žárobetonové směsi. Obsahují jako pojivovou složku hydraulické pojivo a to ve většině případů hlinitanový cement. Tyto směsi vstupují do konstrukce v nevypáleném stavu, pojeny hydraulickou vazbou a po prvním výpalu získávají na pevnostech také díky vazbě keramické.



Na obrázcích 5 až 9 jsou ukázky některých žáromateriálů používaných v průmyslových pecích.



**Obr. 5** Sklářská pec



**Obr. 6** Tunelová pec



**Obr. 7** Rotační pec



**Obr. 8** Pecní vůz



**Obr. 9** Dno licí pánve

# **3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

### 3.1 Cíl experimentální části

Cílem experimentální části je snížit výrobní náklady a vyzkoušet možnosti zvýšení pevností izolačních žáromateriálů použitím žárovzdorných jílu, které mají nižší potřebnou teplotu výpalu pro dosažení rozměrové stálosti v žáru. A to při výrobě jak technologií z plastického těsta, tak lisováním z polosuché směsi. Z navržených receptur bude vybrána ta, která svými vhodnými vlastnostmi převýší směsi ostatní.

### 3.2 Metodika prací

Experimentální část byla rozdělena na základě odlišné technologie výroby keramického střepu do dvou fází. Tyto fáze se od sebe odlišovaly jak způsobem vytváření, tak také lehčením.

- Vytváření z plastického těsta
- Lisování ze zavlhle směsi (drolenky)

Pro každou skupinu bylo použito lehčení vhodné pro danou technologii vytváření. První skupina těles byla vytvářena z plastického těsta. Druhý způsob vytváření byl zvolen kvůli požadavku na vyšší pevnosti, a to byla technologie lisováním ze zavlhle směsi. Lehčení materiálů proběhlo dvěma způsoby. Výrobky z plastického těsta byly pro dosažení vyšší pórovitosti lehčeny způsobem tradičním - tedy vyhořívající přísadou a to konkrétně pilinami. Druhá skupina výrobků - vytvářena lisováním z polosuché směsi, byla lehčena převážně škvárou, dále pak dinasovým zlomem, perlitem, mikrosférami apod.

Zkušební tělesa z plastického těsta byla vyráběna v prostorách laboratoře VUT FAST ze surovin dodaných firmou P-D Refractories. Jedná se o jíly HC/N, HC/R a B1 a dřevěné piliny, které byly na místě sušeny a vmíchávány do směsi po vysušení. Druhou skupinou byla zkušební tělesa vyráběná metodou lisováním z polosuché směsi. Tato výroba nemohla být kvůli nedostatečné vybavenosti laboratoře prováděna přímo na VUT FAST, a proto námi byly vzorky vyrobeny ve společnosti P-D Refractories ve Velkých Opatovicích za odborného dozoru ing. Kováře a výpal probíhal přímo v jejich tunelových pecích společně se zbožím.

## ČÁST A - Zkušební tělesa připravená technologií z plastického těsta

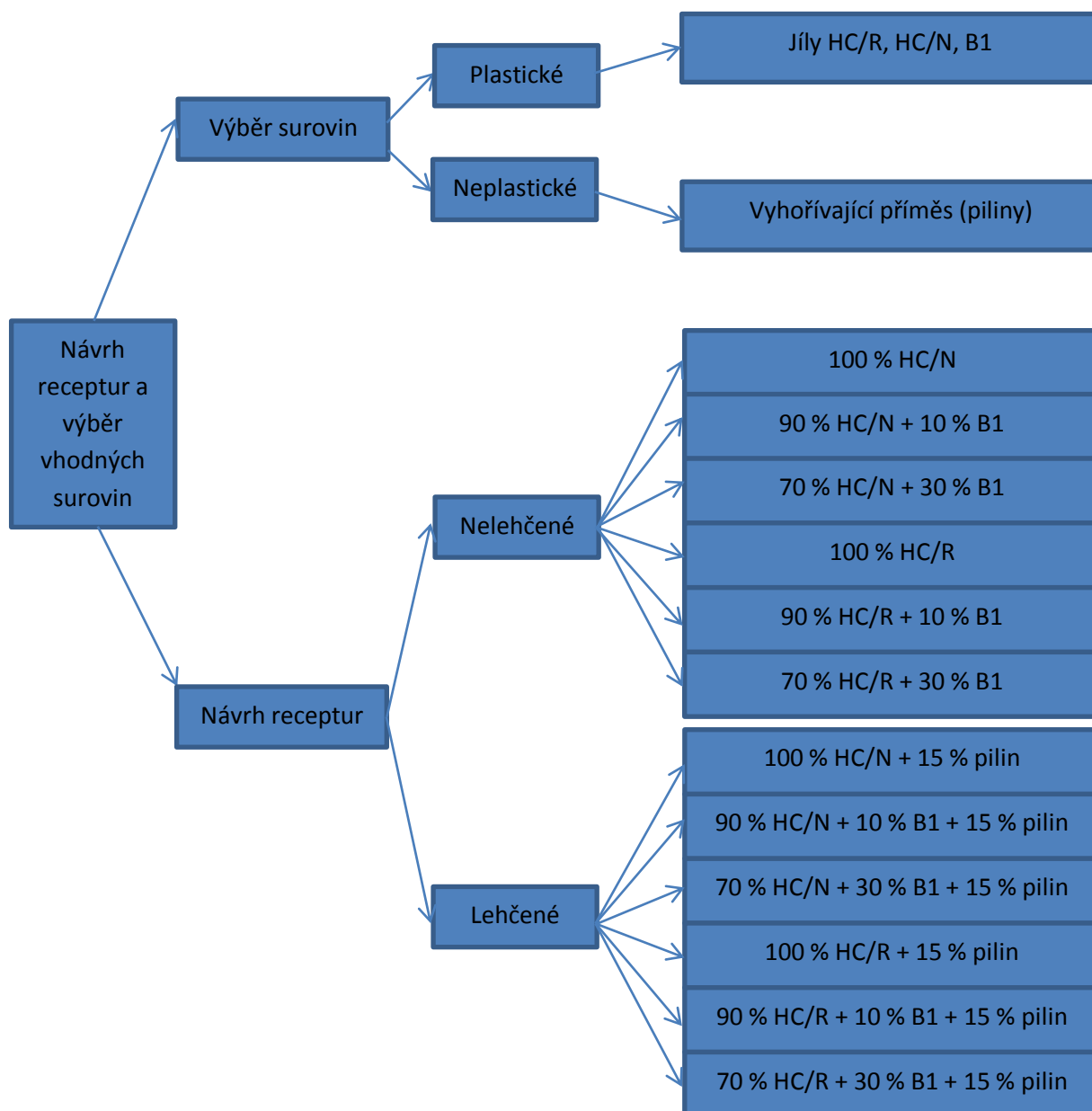
Tato skupina byla dále rozdělena na 2 části:

- Tělesa lehčená pouze keramickou vazbou
- Tělesa lehčená keramickou vazbou i lehčivý

### Vývojový diagram

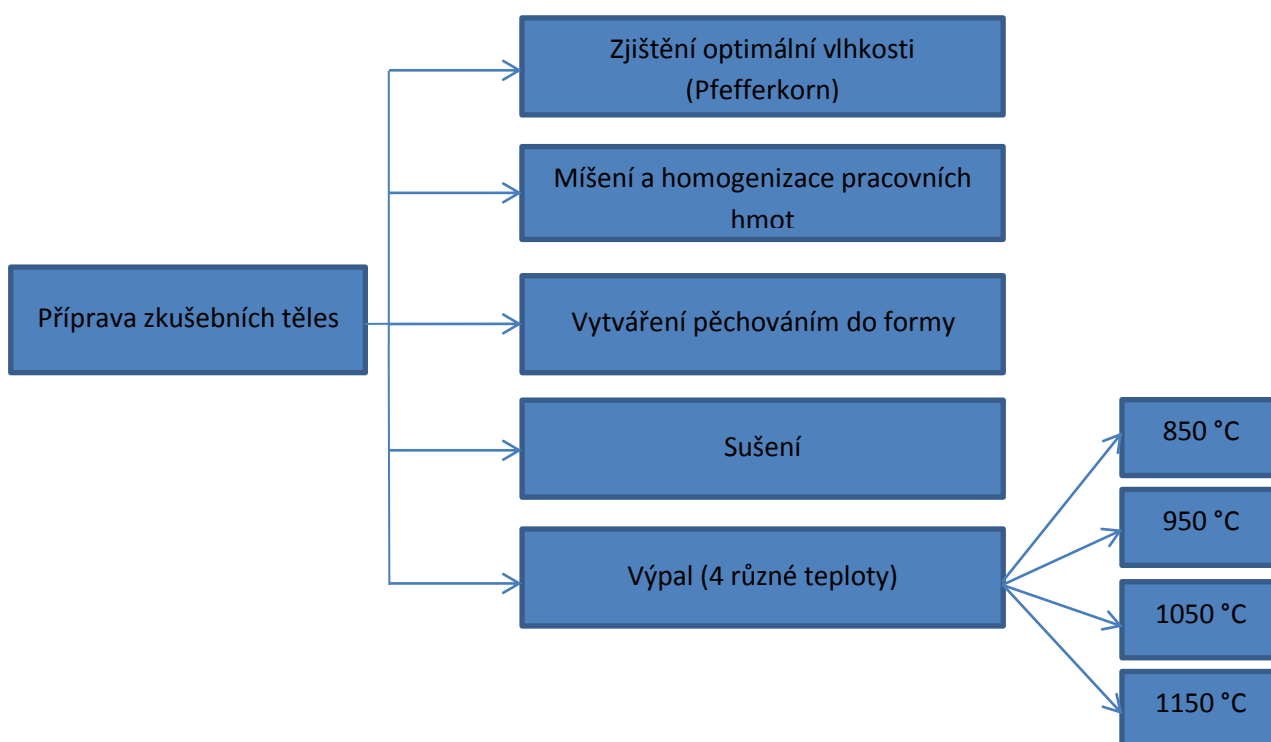
#### Etapa 1.

V první etapě byly navrženy receptury pro výrobu zkušebních těles a pro ně vhodné suroviny. Lehčení bylo provedeno pilinami a to v množství 15 % z celkové hmotnosti těsta.



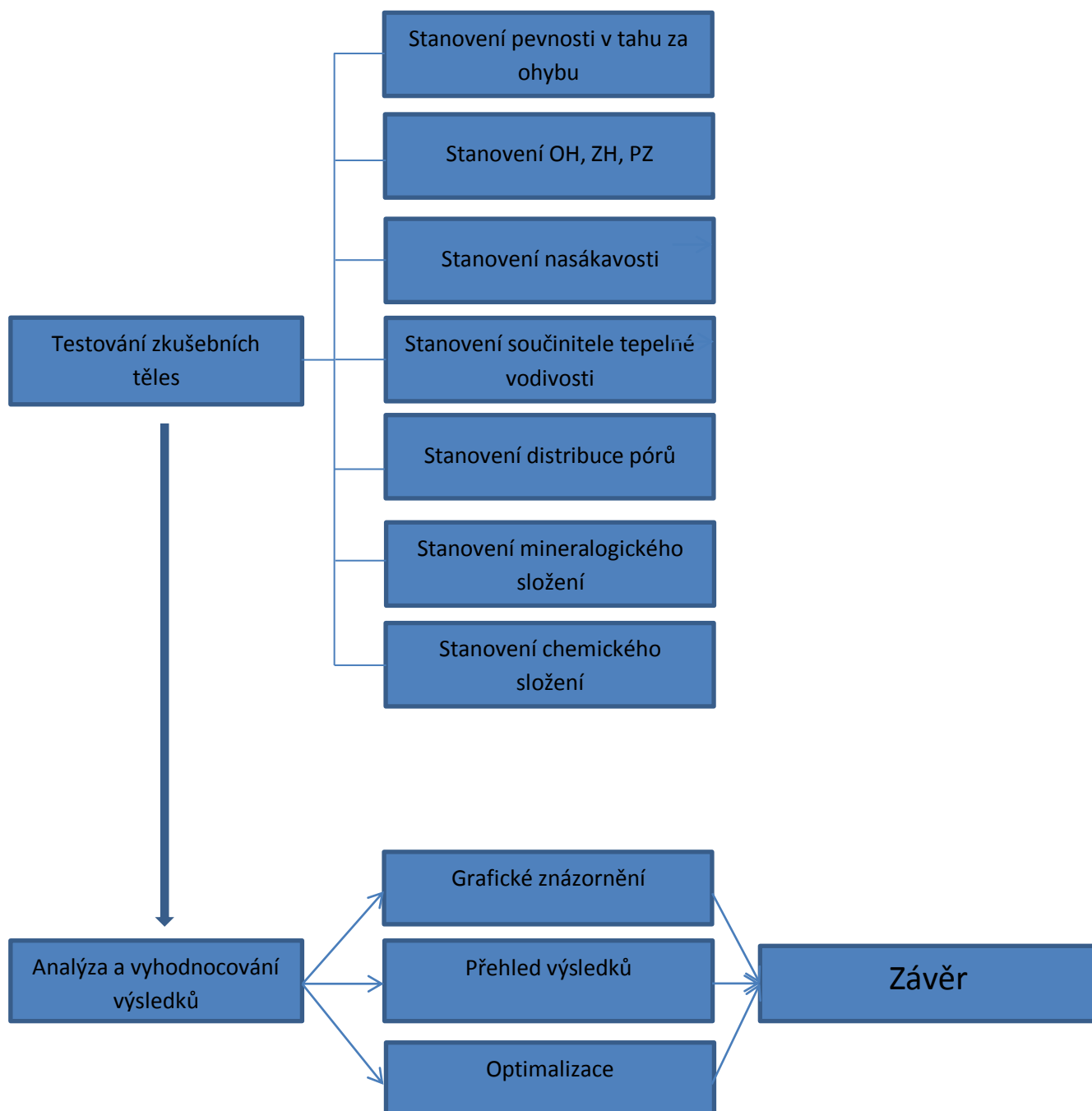
Etapu 2.

Po návrhu vhodné receptury byla na čerstvé směsi zjištěna optimální vlhkost metodou podle Pfefferkorna. Poté byla ze směsí připravována zkušební tělesa technologií z plastického těsta pěchováním do formy o rozměrech 20 x 50 x 100 mm. Po vysušení a zkouškách provedených na vysušených tělesech byla zkušební tělesa vypálena na čtyři různé teploty, které byly navrženy v závislosti na ekonomičnosti a pevnosti výrobků.



Etapu 3.

Ve třetí etapě byly vypálené vzorky testovány na vlastnosti, které jsou důležité pro výsledné parametry výrobku. V tomto případě jsou požadovanými parametry primárně tepelně izolační vlastnosti a dále také dobrá pevnost. Poté byly výsledky shrnuty, zdůvodněny a optimalizovány. Nakonec byla vybrána nejlepší směs a práce shrnuta závěrem.



### 3.3 Použité suroviny

Pro předmět experimentu byly vybrány plastické vstupní suroviny s již prokázanou žárovzdorností. Jednalo se o tyto jíly:

- B1
- HC/N
- HC/R

**Jíl B1** byl v minulosti posuzován v bakalářské práci s názvem „Posuzování vstupních surovin pro výrobu žáromateriálů“ (2011) a jímž jsme se nyní jako velmi kvalitní surovinou pokoušeli zvýšit pevnosti - především pevnost v tahu za ohybu, ale i pevnost v tlaku.

Jíl B1 je jíl kaolinitický, vyznačuje se dobrou slínavostí, střední až vysokou vazností a pevným hutným střepem. Používá se jako vazná a žárovzdorná složka při výrobě žárovzdorných materiálů vysoké hutnosti a pevnosti. Uplatnění nachází zejména při výrobě šamotu. Je také využíván při výrobě dlaždic, obkladaček, komínových vložek atd. V České republice se těží v lokalitě Skalná u Chebu, což bylo ve výše zmíněné práci uváděno.

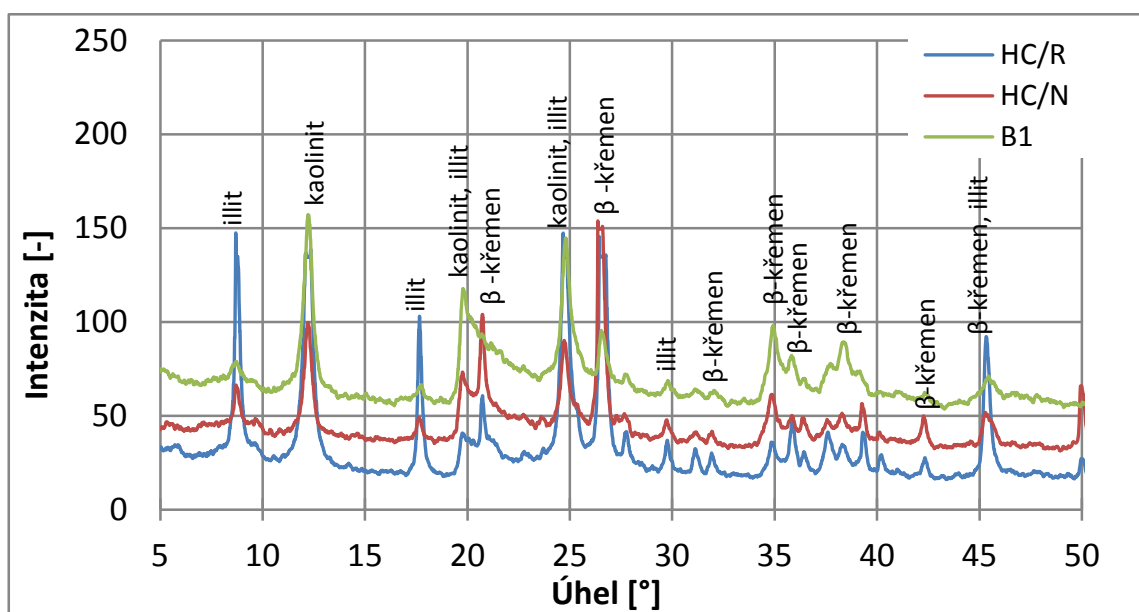
Dále se jednalo o směsi jílu HC s dalšími plastickými surovinami. Konkrétně to jsou **jíly HC/N** (směs jílu HC a Nero v poměru 1:1) a **HC/R**. Jsou to jíly ideální pro výrobu žárovzdorných materiálů do cca 1100 °C. V případě výroby izolačních žáromateriálů je potřeba použít jíly pórovinové, což jíly HC i Nero splňují. Jíl HC/N je s obsahem uhlí. Chemické složení je uvedeno v tabulce 7.

Na obrázku 10 je RTG difrakční analýza nevypálených plastických surovin. Z difraktogramu (graf RTG analýzy) je patrné, že jíl HC/R obsahuje ze všech surovin největší množství jílového minerálu illitu. Jíl HC/N obsahoval illitu střední množství a jíl B1 malé množství. Jíl B1 obsahoval největší množství kaolinitu.

Rentgenová difrakční analýza byla měřena pro úhel  $0 - 62^\circ \Theta$ . Byly vybrány pouze intervaly vhodné pro vyhodnocení (jedná se o úsek  $5 - 50^\circ$ ) a pro lepší přehlednost, čitelnost a možnost porovnání různých jíků či teplot, byly jednotlivé křivky navzájem posunuty o hodnotu 15 jednotek intenzity.

**Tab. 7** Chemické složení použitých surovin

Název jílu		B1	HC/N	HC/R
Možnosti použití		Žáromateriály, cihlářské výrobky		
Druh jílu		žárovzdorný	žárovzdorný pórovinový	
Barva jílu		světle modravě šedý	černý	žlutý
Ztráta žíháním (%)		11 - 13	20 - 26	8 - 12
Chemické složení [%]	SiO <sub>2</sub>	48 - 52	60 - 62	62 - 65
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32 - 34	30 - 32	28 - 31
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,3 - 2,7	1,3 - 1,9	1,7 - 2,0
	TiO <sub>2</sub>	0,8 - 1,2	0,9 - 1,2	0,6 - 0,9
	CaO	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	0,0 - 0,1
	MgO	0,2 - 0,4	0,3 - 0,5	0,2 - 0,5
	Na <sub>2</sub> O	0,0 - 0,2	0,1 - 0,4	0,1 - 0,3
	K <sub>2</sub> O	1,5 - 2,0	2,5 - 3,5	3,1 - 3,7

**Obr. 10** Mineralogické složení použitých surovin

Jako vyhořívající příměs (pro vylehčení) byly vybrány kvůli nízké ceně a snadné dostupnosti **piliny**. Jsou vhodné zejména při technologii vytváření z plastického těsta. Piliny použité pro tento experiment jsou z měkkého smrkového dřeva přetříděné přes síto s velikostí oka 3 mm.



### 3.4 Návrh receptur

Receptury pro výrobu zkušebních těles jsou přehledně navrženy v tabulce 8. Označení písmenem - P znázorňuje vylehčení pilinami. Bylo navrženo 6 nelehčených a 6 lehčených receptur.

**Tab. 8** Označení receptur

Označení	Obsah keramické vazby [%]			Lehčivo [%]
	HC/N	HC/R	B1	Piliny
N	100			
R		100		
90N	90		10	
70N	70		30	
90R		90	10	
70R		70	30	
N-P	100			15
R-P	100			15
90N-P	90		10	15
70N-P	70		30	15
90R-P		90	10	15
70R-P		70	30	15

### 3.5 Příprava zkušebních těles

Přesným nadávkováním a zhomogenizováním jednotlivých surovin bylo následně vytvořeno plastické těsto optimální konzistence, která byla nejprve zjištěna a ověřena na Pfefferkornově přístroji dle ČSN 721074 (viz obrázek 12).

Z každé z dvanácti navržených směsí uvedených v kapitole 3.4 Návrh receptur bylo pomocí mosazné formy (viz obrázek 11) přechováním vytvořeno dvanáct zkušebních těles o rozměrech 25 x 20 x 100 mm. A také těleso o rozměrech 50 x 20 x 100 mm (viz obrázek 13) na zjištění citlivosti k sušení podle Bigota a součinitele tepelné vodivosti.



Obr. 11 Mosazná forma

Tři zkušební tělesa z každé navržené směsi byla poté vysušena a vypálena v peci na teploty 850 °C, 950 °C, 1050 °C a 1150 °C.

### 3.6 Metodika testování zkušebních těles za surova

#### 3.6.1 Stanovení deformačního poměru dle Pfefferkorna (ČSN 721074)

Pro výrobu zkušebních těles z plastického těsta je potřeba určit optimální množství vody přidané do směsi, k čemuž slouží stanovení deformačního poměru dle Pfefferkorna. Byla vytvořena plastická těsta podle navržených receptur s optimální vlhkostí odpovídající deformačnímu poměru = 0,6 dle Pfefferkorna. Tento konstantní deformační poměr zajišťuje shodnou plastičnost u různých směsí. Deformační poměr se spočte ze vzorce:

$$d = \frac{h_1}{h_0} \quad [-]$$

$h_0$	výška zkušebního tělesa před deformací	[mm]
$h_1$	výška zkušebního tělesa po deformaci	[mm]
$d$	deformační poměr	[-]



Obr. 12 Zjišťování deformačního poměru pomocí Pfefferkorna

### 3.6.2 Stanovení vlhkosti pracovní hmoty

Zkoušená tělesa pro stanovení vlhkosti pracovní hmoty byla bezprostředně po vzniku zvážena s přesností na 0,01 g. Poté byly vzorky vloženy do sušárny, kde při teplotě 110 °C proběhlo odpaření vody. Následně byla tělesa zvážena znovu. Vlhkost pracovní hmoty byla určena jako:

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_s} \quad [\%]$$

$m_w$  hmotnost zkušebního tělesa za syrova [g]

$m_s$  hmotnost zkušebního tělesa po vysušení [g]

### 3.6.3 Stanovení citlivosti k sušení dle Bigota (ČSN 72 1565-11)

Určením citlivosti k sušení podle Bigota lze zjistit parametr, jehož hodnotou zjistíme chování zkušebních směsí v průběhu sušení a možnost vzniku trhlin a nepřipustného přetvoření. Tento jev vzniká vlivem odparu vody ze syrové směsi. Citlivost k sušení byla určena Bigotovou křivkou, která udává závislost celkového smrštění (DC) na vlhkosti. Citlivost byla zjištěna ze vzorce:

$$CSB = \frac{w_a - w_{kb}}{w_{kb}} \quad [^\circ]$$

$w_a$  absolutní vlhkost výlisku [g]

$w_{kb}$  vlhkost kritického bodu [g]

Vyhodnocení citlivosti k sušení bylo provedeno podle stupnice:

CSB	< 1	surovina je málo citlivá k sušení
CSB	(1;1,5)	surovina je středně citlivá k sušení
CSB	(1,5;2)	surovina je citlivá k sušení
CSB	> 2	surovina je velmi citlivá k sušení



**Obr. 13** Zkušební tělesa pro zjištění citlivosti k sušení podle Bigota

### 3.7 Metodika testování zkušebních těles po vysušení

#### 3.7.1 Stanovení smrštění sušením

Poté co byla vytvořena zkušební hmota, byla zkušební tělesa speciálně k tomu určená (použity vzorky pro citlivost k sušení podle Bigota) průběžně měřená a vážená pro citlivost k sušení. Při zjištění ustálení hmotnosti vzorků při teplotě místnosti, byla tělesa umístěna do sušárny a vysušena teplotou 110 °C. Následně byly vzorky vyjmuty a na nich bylo stanoveno smrštění sušením.

Rysky na vysušeném tělese ve vzdálenosti 80 mm od sebe, které byly do vzorku vtisknuty ještě za čerstvého stavu, byly po sušení změřeny a následně vypočítáno smrštění sušením podle vzorce:

$$DS = \frac{l_s - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

$l_0$       základní vzdálenost otisku      [mm]

$l_s$       vzdálenost otisků po vysušení      [mm]

### 3.8 Metodika testování zkušebních těles po výpalu

Vysušená zkušební tělesa byla rozdělena a vypálena v laboratorní peci (viz obrázek 14) na zvolené teploty 850 °C, 950 °C, 1050 °C a 1150 °C. Vychládání těles probíhalo samovolně.



Obr. 14 Laboratorní pec

### 3.8.1 Stanovení smrštění pálením

Smrštění pálením probíhá stejně jako smrštění sušením, pouze s tím rozdílem, že ke smršťování dochází při vyšších teplotách a je způsobeno modifikačními přeměnami minerálů a odchodem spalitelných látek. Bylo prováděno pro všechny vypalovací teploty. Vypočítá se ze vzorce:

$$DP = \frac{l_p - l_s}{l_s} \cdot 100 \quad [\%]$$

$l_p$  vzdálenost otisků po vypálení [mm]

$l_s$  vzdálenost otisků po vysušení [mm]

### 3.8.2 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu zkušebních těles

Pevnost v tahu za ohybu lze charakterizovat jako schopnost výrobku vzdorovat účinkům síly, která na něj působí. Pro menší tělesa vytvořená v laboratoři se stanovuje ve většině případů Michaelisovým přístrojem (viz obr. 15).

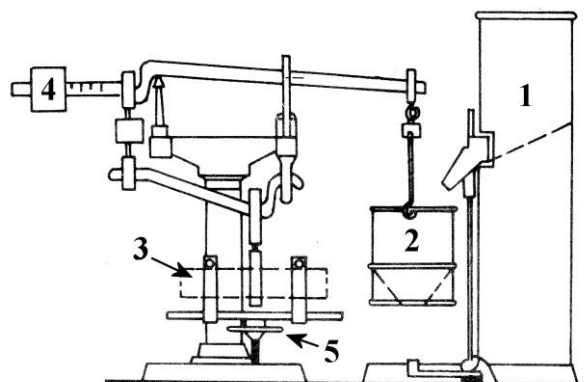
Je to vlastnost materiálu, která je závislá na pórovitosti a objemové hmotnosti. Pevnost v tahu za ohybu udává, jak vysoké zatížení v ohybu je schopen daný prvek přenést než se poruší tahem. Při ohybu probíhají v některých místech tělesa podobné děje, jako by bylo zkušební těleso namáháno pouze tahem nebo tlakem.

Jednotlivá tělesa byla vkládána do Michaelisova přístroje tak, že na podpěrách trojúhelníkového tvaru se zaobleným vrcholem ležela na každé z podpěr stejnou částí. Břity byly dotáhnuty upínacím šroubem na dotyk, čímž se vzorek upevnil. Uvolnili jsme západku zásobníku broků, která posléze naplnila misku sloužící pro jejich zachytávání. Po zlomení tělesa byla západka zásobníku automaticky uzavřena. Zvážili jsme hmotnost broků potřebnou pro zlomení a ze vztahu byla vypočítána pevnost v tahu za ohybu v MPa. Vzdálenost břitů je 80 mm, poměr 1:50.

Vyhodnocení zkoušky tahu za ohybu na Michaelisově přístroji se provede podle vzorce:

$$R_t = \frac{M}{V} = \frac{F \cdot \frac{l}{4}}{b \cdot \frac{h^2}{6}} = \frac{1,5 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^2} \quad [MPa]$$

F	zatěžovací síla	[N]
l	vzdálenost podpor	[mm]
b	rozměr tělesa ve tvaru hranolu (šířka)	[mm]
h	rozměr tělesa ve tvaru hranolu (výška)	[mm]



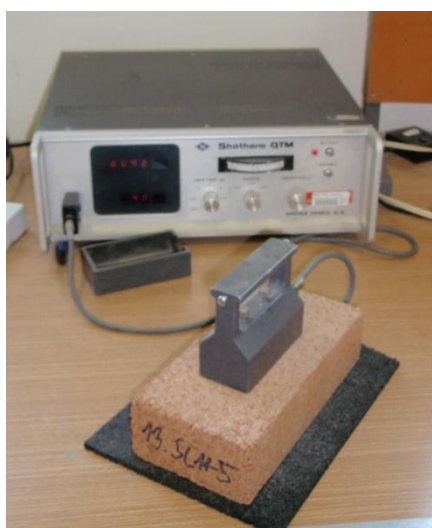
Popis přístroje:

- 1 – zásobník na zatěžovací broky
- 2 – miska na zachycení broků
- 3 – zkušební těleso
- 4 – závaží
- 5 – upínací šroub

**Obr. 15** Michaelisův přístroj

### 3.8.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Pro stanovení součinitele tepelné vodivosti si lze vybrat z několika variant zjišťování. Námi stanovovaný součinitel tepelné vodivosti byl zjištěn na zařízení Shotherm QTM (viz obr. 16) v prostorách laboratoře VUT FAST. Toto zařízení funguje na principu metody topného drátu. Tato metoda bývá často používána v průmyslových přístrojích, přičemž pro zjednodušení měření je tepelný zdroj integrován přímo v tělese zkušební sondy. Měření se provádí v souladu s normou ČSN EN ISO 8894-1.



**Obr. 16** Zařízení pro měření součinitele tepelné vodivosti

### 3.8.4 Stanovení objemové hmotnosti, zdánlivé pórovitosti a zdánlivé hustoty

Objemová hmotnost stanovuje hmotnost vysušeného zkušební tělesa včetně všech pórů na jednotku objemu. Určuje se zvážení na hydrostatických vahách (viz obrázek 17) na tenkém vytárovaném závěsu. Při tomto postupu je využíváno Archimédova zákona. Zkušební postup je uveden v ČSN EN 1094-4.

$$OH = \frac{m_s}{m_n - m_{nv}} \cdot 1000 \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$m_s$	hmotnost suchého vzorku	[g]
$m_n$	hmotnost nasáklého vzorku	[g]
$m_{nv}$	hmotnost nasáklého vzorku váženého pod vodou	[g]

Zdánlivá hustota udává hmotnost vysušeného zkušební tělesa na jednotku jeho objemu, a to včetně uzavřených pórů. Pokud zkušební těleso neobsahuje uzavřené póry, pak se jeho zdánlivá hustota rovná hustotě měrné.

$$ZH = \frac{m_s}{m_s - m_{nv}} \cdot 1000 \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$m_s$	hmotnost suchého vzorku	[g]
$m_{nv}$	hmotnost nasáklého vzorku váženého pod vodou	[g]

Zdánlivá pórovitost udává poměr mezi objemem otevřených pórů zkušební tělesa k objemu celkovému.

$$PZ = \frac{m_n - m_s}{m_n - m_{nv}} \cdot 100 \quad [\%]$$

$m_s$	hmotnost suchého vzorku	[g]
$m_n$	hmotnost nasáklého vzorku	[g]
$m_{nv}$	hmotnost nasáklého vzorku váženého pod vodou	[g]



**Obr. 17** Měření objemové hmotnosti (hydrostatické vážení)

### 3.8.5 Stanovení nasákavosti

Nasákavostí se rozumí maximální množství vlhkosti, které v materiálu může být obsaženo. Tato vlastnost je určena přírůstkem hmotnosti po nasycení vodou. Relativně přesně určuje pórovou strukturu materiálu, a proto je důležitým ukazatelem mikrostruktury vypáleného střepe. V keramice může být také ukazatelem slinutosti střepe.

Nasákavost se udává stejně jako hmotnostní vlhkost poměrem mezi hmotností nasáklé vlhkosti a hmotností suchého vzorku materiálu. Udává se buď po jisté době ponoření vzorku do kapaliny (po 1. hod, 24. hod. apod.), nebo svou největší hodnotou, tj. teoreticky po nekonečné době, kdy budou všechny póry už absolutně naplněny vodou.

Nasákavost se vypočítá ze vzorce:

$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad [\%]$$

$m_s$  hmotnost suchého vzorku [g]

$m_n$  hmotnost nasáklého vzorku [g]



### 3.8.6 Stanovení mineralogického složení

Pro stanovení mineralogického složení se nejčastěji používá metoda rentgenové difrakční analýzy (RTG). Metody rentgenové analýzy jsou založené na interferenci rentgenového záření a vycházejí z toho, že v pevné látce je možno si představit soustavu stejně od sebe vzdálených rovnoběžných rovin. Ty jsou tvořeny periodicky uspořádanými atomy či ionty. Při interakci se zářením o vlnové délce menší či srovnatelné s mřížkovou mezirovinnou vzdáleností dojde k difrakci rentgenového záření, je-li splněna Braagova rovnice [17]:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$$

n	řád difrakce (celé číslo 1, 2, 3, apod.)	
$\lambda$	vlnová délka záření	[m]
d	vzdálenost dvou sousedních rovin	[m]
$\theta$	úhel dopadu záření	[°]

Nejprve byl vzorek rozdrcen na očištěné ploše a poté byl nadrcený materiál vložen do vibračního mlýna a mlet po dobu dostačující pro pomletí vzorku na velikost frakce 0,063 mm. Tento materiál byl umístěn do RTG-difrakčního analyzátoru, kde byly vzorky testovány. Získané hodnoty byly následně vyhodnoceny. Naším způsobem identifikace bylo vizuální porovnání hodnot d a I odečtených z grafů RTG difrakční analýzy, které jsme vytvořili na základě získaných hodnot úhlů a intenzit naměřených analyzátozem, s hodnotami tabelovanými.

### 3.8.7 Stanovení distribuce pórů

Jedním z důležitých parametrů hodnocení kvality vypáleného zkušebního tělesa je pórovitost. Slouží k určení celkového objemu pórů v poměru k celkovému objemu keramického střepu a k jejich distribuci v tělese, ať již podle tvaru či velikosti. Póry jsou děleny dle jejich velikosti na mikropóry a makropóry, podle druhu potom na uzavřené a otevřené. Údaje o distribuci a rozměrech pórů lze získat vysokotlakou rtuťovou porozimetrií, optickými metodami jako je mikroskopické posouzení, případně jinak [18].

Námi zvoleným způsobem posouzení pórovitosti byla metoda vysokotlaké rtuťové porozimetrie. Metoda je založena na principu vnikání rtuti do mikropórů

vzorku vlivem definovaného, rovnoměrně se zvyšujícího tlaku. Využívá se zde skutečnosti, že rtuť nesmáčí většinu pevných látek, a proto bez působení vnějšího tlaku do jejich pórů nevniká. Určení velikosti mikropórů je založeno na chování nesmáčivých kapalin v kapilárách, tj. takových, které mají úhel smáčení větší než 90 °. V kapilárách vyvolávají jev, zvaný kapilární deprese. Změří se množství vtlačené rtuti v závislosti na tlaku a výsledek se zjistí vztahem, který definuje závislost mezi poloměrem pórů a vynaloženým tlakem. Rozměry pórů se určí ze vzorce [19]:

$$r = \frac{2 \cdot 0,48 \cdot |\cos 141,3|}{p} = \frac{0,75}{p} \quad [m]$$

r	poloměr póru	[m]
p	působící tlak	[MPa]



Obr. 18 Porozimetr pro vysoký (Pascal 240) a nízký tlak (Pascal 140)

### 3.9 Výsledky experimentů na zkušebních tělesech vyráběných technologií z plastického těsta

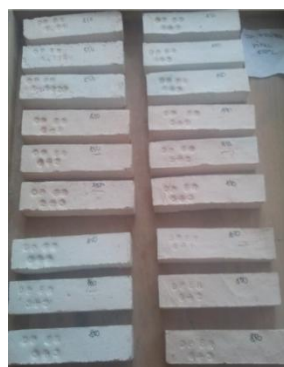
#### 3.9.1 Stanovení vlhkosti pracovní hmoty

Vlhkosti pracovních hmot zjištěných způsobem uvedeným v kapitole 3.6.2 jsou uvedeny v tabulce 9. Zkušební tělesa jsou na obrázcích 19 a 20.

**Tab. 9** Optimální vlhkosti pracovních hmot

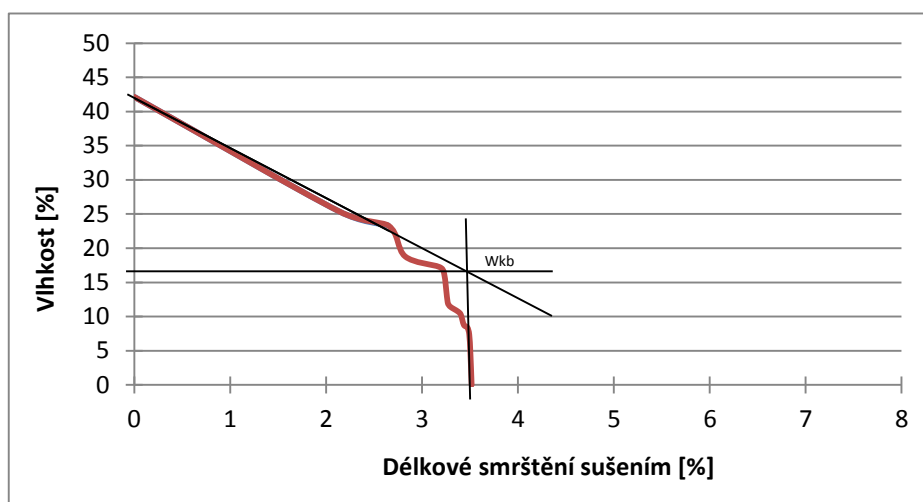
Označení	Vlhkost [%]
N	35,74
90N	35,63
70N	27,14
N-P	44,35
90N-P	42,32
70N-P	40,01

Označení	Vlhkost [%]
R	29,30
90R	29,11
70R	27,14
R-P	35,80
90R-P	34,96
70R-P	33,48

**Obr. 19** Tělesa před výpalem**Obr. 20** Po výpalu na 850°C

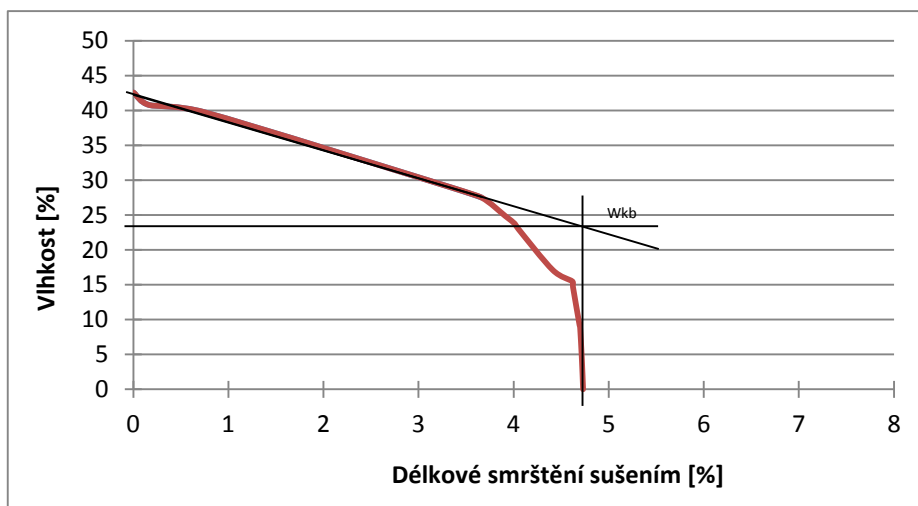
### 3.9.2 Citlivost k sušení dle Bigota

Zjištěná citlivost k sušení podle Bigota je v tabulce 10. Bigotovy křivky pak na obrázcích 21 až 32.

**Obr. 21** Bigotova křivka - receptura N

Vzorový výpočet:

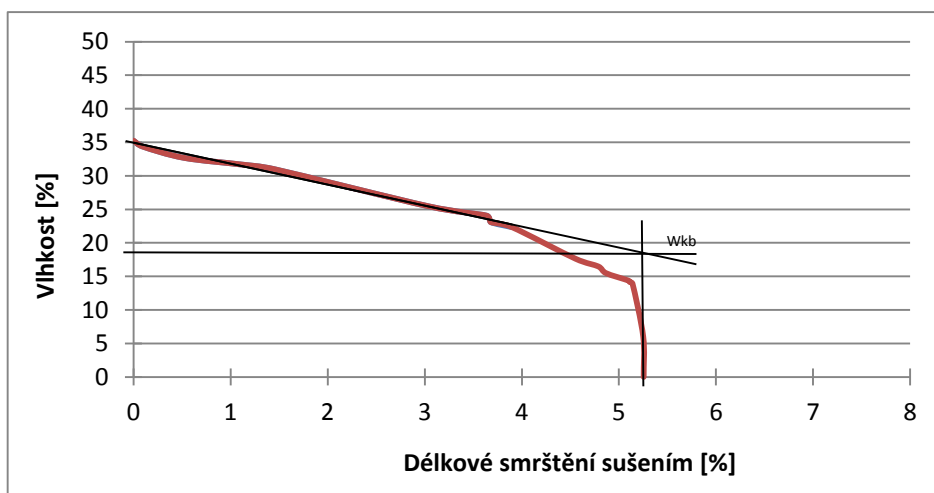
$$CSB = \frac{42,14 - 16,1}{16,1} = \underline{\underline{1,62}} < 2 \quad \text{Směs N je citlivá k sušení}$$



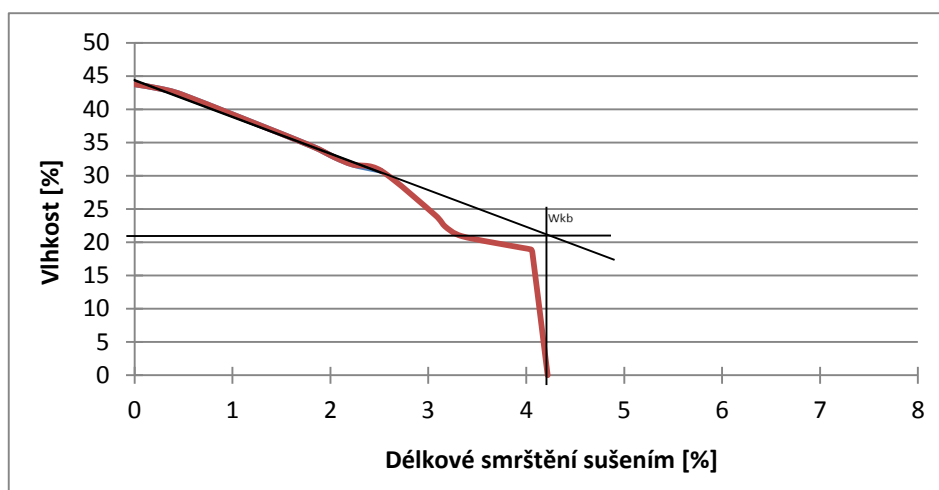
Obr. 22 Bigotova křivka - receptura 90N

CSB = 0,77 &lt; 1

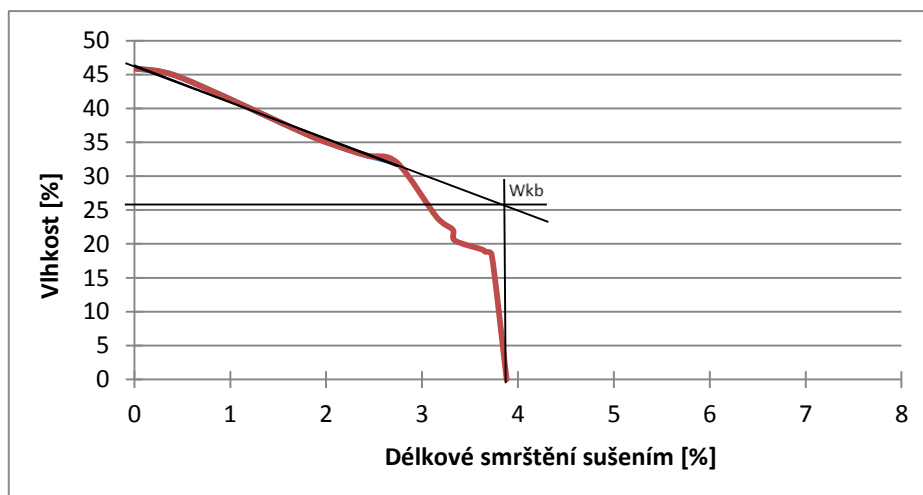
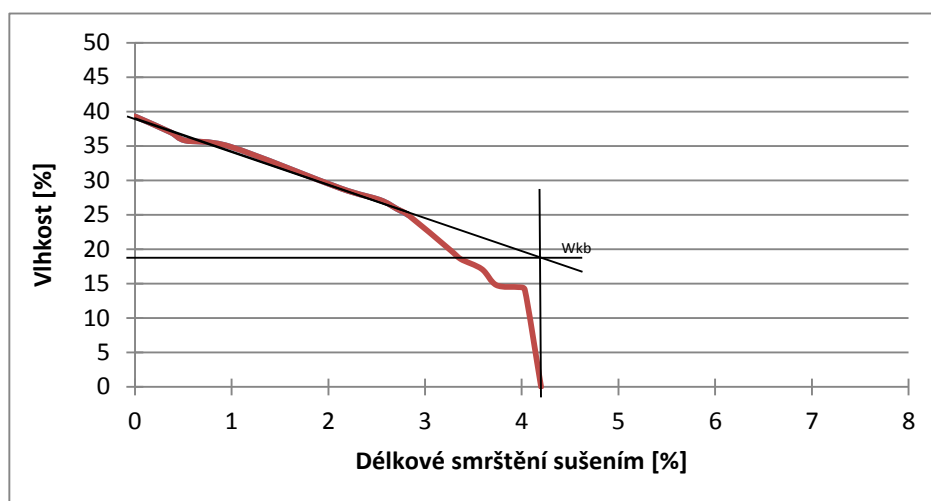
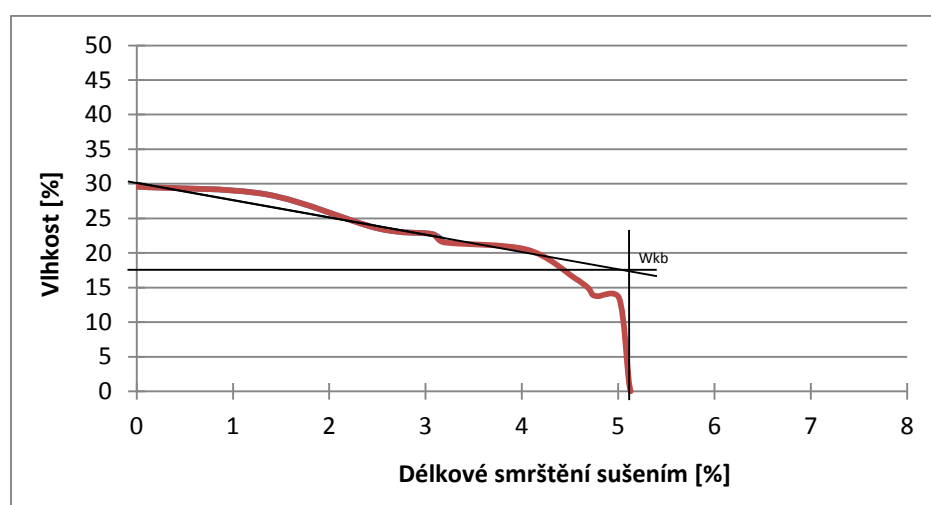
Směs 90N je málo citlivá k sušení

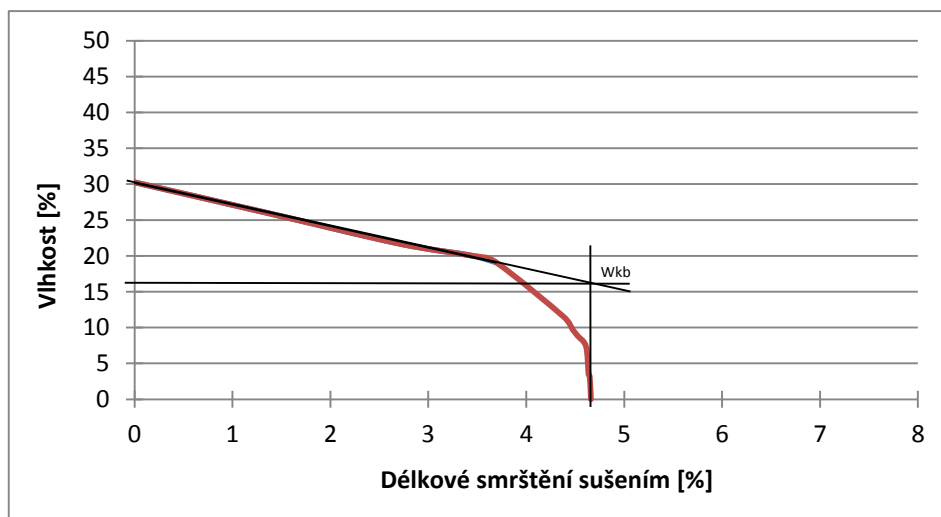
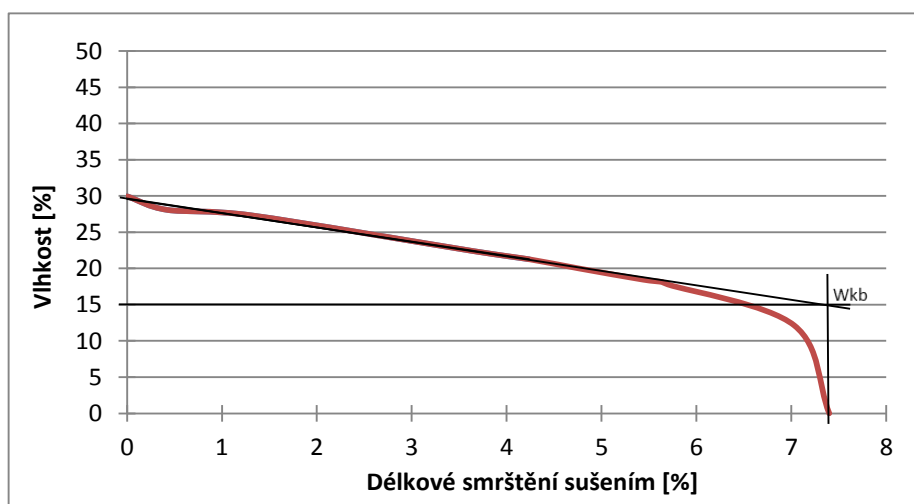
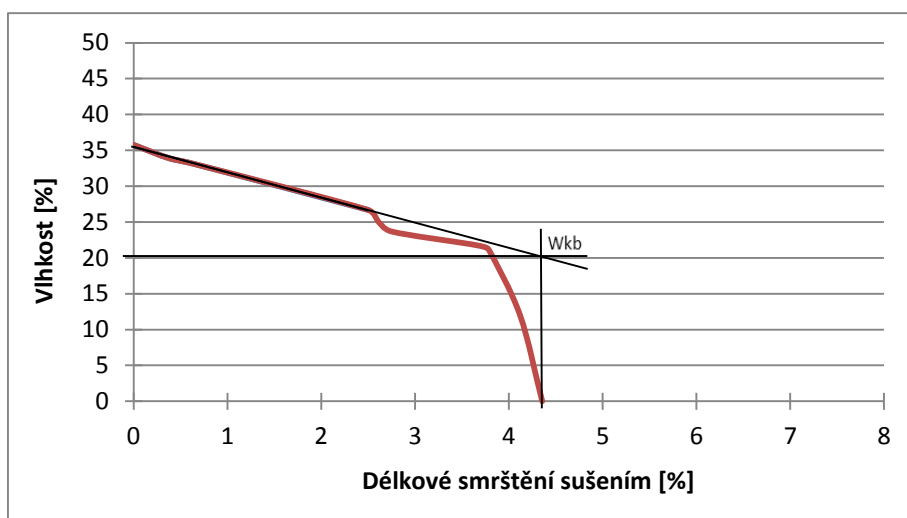


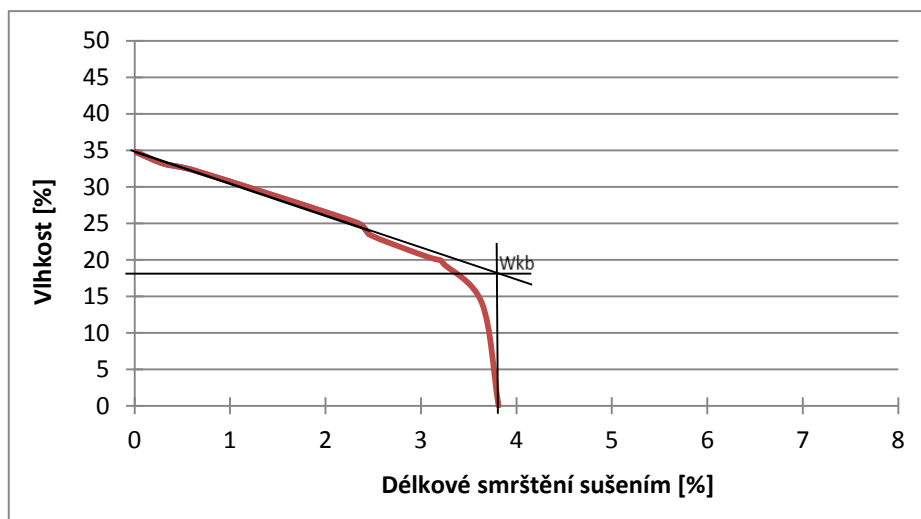
Obr. 23 Bigotova křivka - receptura 70N



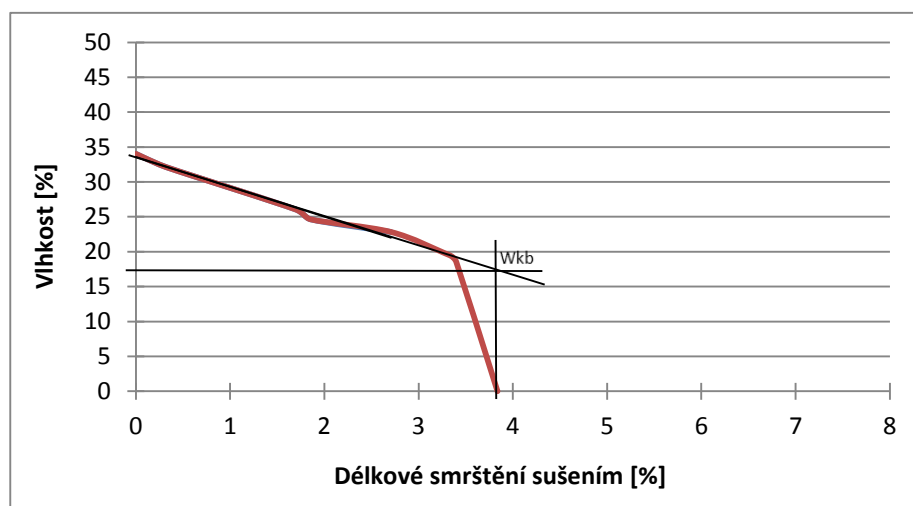
Obr. 24 Bigotova křivka - receptura N-P

**Obr. 25** Bigotova křivka - receptura 90N-P**Obr. 26** Bigotova křivka - receptura 70N-P**Obr. 27** Bigotova křivka - receptura R

**Obr. 28** Bigotova křivka - receptura 90R**Obr. 29** Bigotova křivka - receptura 70R**Obr. 30** Bigotova křivka - receptura R-P



Obr. 31 Bigotova křivka - receptura 90R-P



Obr. 32 Bigotova křivka - receptura 70R-P

Tab. 10 Shrnutí citlivosti k sušení

Označení	CSB [/]	Citlivost k sušení
N	1,62	je citlivá k sušení
90N	0,77	je málo citlivá k sušení
70N	0,91	je málo citlivá k sušení
N-P	1,15	je středně citlivá k sušení
90N-P	0,83	je málo citlivá k sušení
70N-P	1,07	je středně citlivá k sušení

Označení	CSB [/]	Citlivost k sušení
R	0,77	je málo citlivá k sušení
90R	0,88	je málo citlivá k sušení
70R	0,98	je málo citlivá k sušení
R-P	0,78	je málo citlivá k sušení
90R-P	0,91	je málo citlivá k sušení
70R-P	1,01	je středně citlivá k sušení

### 3.9.3 Smrštění sušením

Stanovené smrštění sušením je pro každou směs hodnotou danou průměrem z měření dvanácti těles. Jak je vidět v tabulce 11, směsi s přídavkem pilin vykazovali smrštění sušením podstatně menší než receptury ostatní. Z těchto výsledků lze tedy říci, že dřevěné piliny v čerstvé směsi fungují jako ostřivo. Také

je patrné, že při přidavku B1 se zvyšovalo smrštění. Znaménkem mínus je označeno smrštění zkušebních těles.

**Tab. 11** Smrštění sušením

Označení	DS [%]	Označení	DS [%]
N	-3,4	R	-3,9
90N	-4,3	90R	-3,9
70N	-4,9	70R	-4,6
N-P	-1,9	R-P	-2,6
90N-P	-3,7	90R-P	-3,2
70N-P	-4,2	70R-P	-3,9

### 3.9.4 Smrštění pálením, smrštění celkové

Délkové změny pálením jsou uvedeny v tabulkách 12 a 13. Z tabulek je patrné, že se zvyšující se teplotou výpalu se zvyšovalo i smrštění. Znaménkem mínus je označeno smrštění vzorku. Kladné hodnoty značí nárůst objemu. Přídavek B1 ve většině případů smrštění zvyšoval. Hodnoty byly spočteny podle vzorce v kapitole 3.8.1. Hodnoty v závorce označují celkové délkové změny zkušebního tělesa.

**Tab. 12** Délkové změny pálením a celkové pro receptury s obsahem HC/N

Vypalovací teplota	Délkové změny pálením [%] (Délkové změny celkem [%])					
	N-P	90N-P	70N-P	N	90N	70N
850 °C	0,2 (-1,7)	0,3 (-3,4)	0,7 (-3,5)	-0,2 (-3,6)	0,0 (-4,3)	-0,4 (-5,3)
950 °C	-0,9 (-2,8)	-0,3 (-4,0)	-1,3 (-5,5)	-1,1 (-4,5)	-0,9 (-5,2)	-2,3 (-7,2)
1050 °C	-6,0 (-7,9)	-5,5 (-9,2)	-7,0 (-11,2)	-5,3 (-8,7)	-7,0 (-11,3)	-7,0 (-11,9)
1150 °C	-8,6 (-10,5)	-7,1 (-10,8)	-6,4 (-10,6)	-9,1 (-12,5)	-7,8 (-12,1)	-9,0 (-13,9)

**Tab. 13** Délkové změny pálením a celkové pro receptury s obsahem HC/R

Vypalovací teplota	Délkové změny pálením [%] (Délkové změny celkem [%])					
	R-P	90R-P	70R-P	R	90R	70R
850 °C	1,0 (-1,6)	1,1 (-2,1)	0,9 (-2,9)	0,8 (-3,1)	0,6 (-3,3)	0,4 (-4,2)
950 °C	0,2 (-2,4)	-0,1 (-3,2)	-0,9 (-4,8)	0,5 (-3,4)	-0,3 (-4,2)	-0,6 (-5,2)
1050 °C	-2,6 (-5,2)	-3,6 (-6,8)	-5,1 (-9,0)	-2,6 (-6,5)	-4,4 (-8,3)	-4,9 (-9,5)
1150 °C	-3,9 (-6,5)	-3,8 (-7,0)	-6,6 (-10,5)	-4,8 (-8,7)	-5,3 (-9,2)	-6,8 (-11,4)



### 3.9.5 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

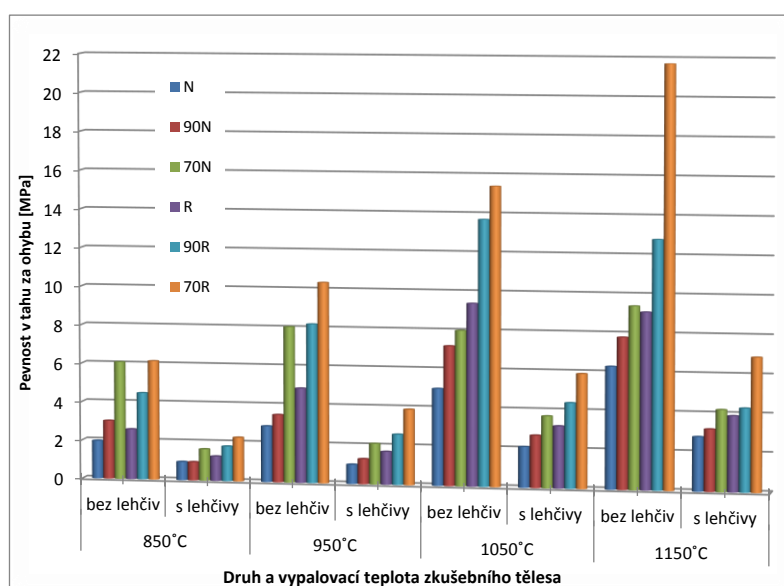
Pevnosti v tahu za ohybu byly zkoušené na Michaelisově přístroji (viz výše). Hodnoty jsou pro tělesa s obsahem jílu HC/N uvedeny v tabulce 14 a pro tělesa s obsahem HC/R v tabulce 15, grafické znázornění pak na obrázku 33. Na obrázku. 35 až 38 lze spatřit závislost pevnosti v tahu za ohybu na objemové hmotnosti.

**Tab. 14** Pevnosti v tahu za ohybu těles obsahujících jíl HC/N

Vypalovací teplota	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]					
	N-P	90N-P	70N-P	N	90N	70N
850°C	1,0	1,0	1,6	2,0	3,0	6,1
950°C	1,0	1,3	2,1	2,9	3,5	8,0
1050°C	2,1	2,7	3,7	5,0	7,2	8,0
1150°C	2,8	3,2	4,2	6,3	7,8	9,4

**Tab. 15** Pevnosti v tahu za ohybu těles obsahujících jíl HC/R

Vypalovací teplota	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]					
	R-P	90R-P	70R-P	R	90R	70R
850°C	1,3	1,8	2,3	2,6	4,5	6,2
950°C	1,7	2,6	3,9	4,9	8,2	10,4
1050°C	3,2	4,3	5,9	9,4	13,7	15,4
1150°C	3,9	4,3	6,9	9,1	12,8	21,7



**Obr. 33** Grafické znázornění pevností v tahu za ohybu

### 3.9.6 Stanovení objemové hmotnosti, zdánlivé pórovitosti a zdánlivé hustoty

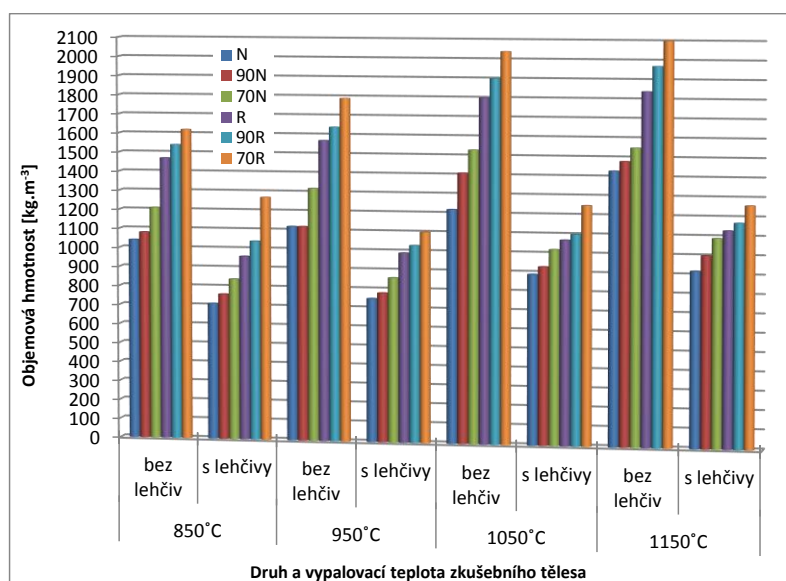
Objemová hmotnost je jeden z nejdůležitějších ukazatelů pro kvalitu izolačních žáromateriálů (požaduje se hodnota co možná nejnižší, při zachování dobré pevnosti), a proto bylo k objemové hmotnosti graficky vztaženo několik dalších veličin. Hodnoty objemové hmotnosti jsou stanoveny v tabulce 16 a 17. Grafické porovnání lze sledovat na obrázku 34.

**Tab. 16** Objemové hmotnosti těles obsahujících jíl HC/N

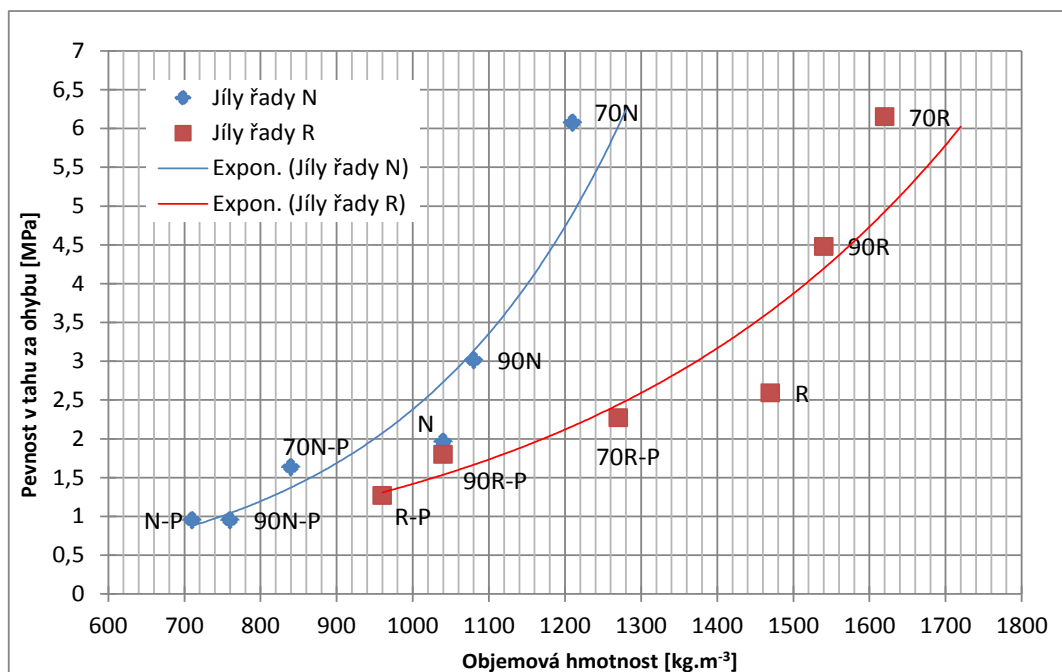
Vypalovací teplota	Objemová hmotnost [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]					
	N-P	90N-P	70N-P	N	90N	70N
850°C	710	760	840	1040	1080	1210
950°C	750	780	860	1120	1120	1320
1050°C	890	930	1020	1220	1410	1530
1150°C	920	1000	1090	1430	1480	1550

**Tab. 17** Objemové hmotnosti těles obsahujících jíl HC/R

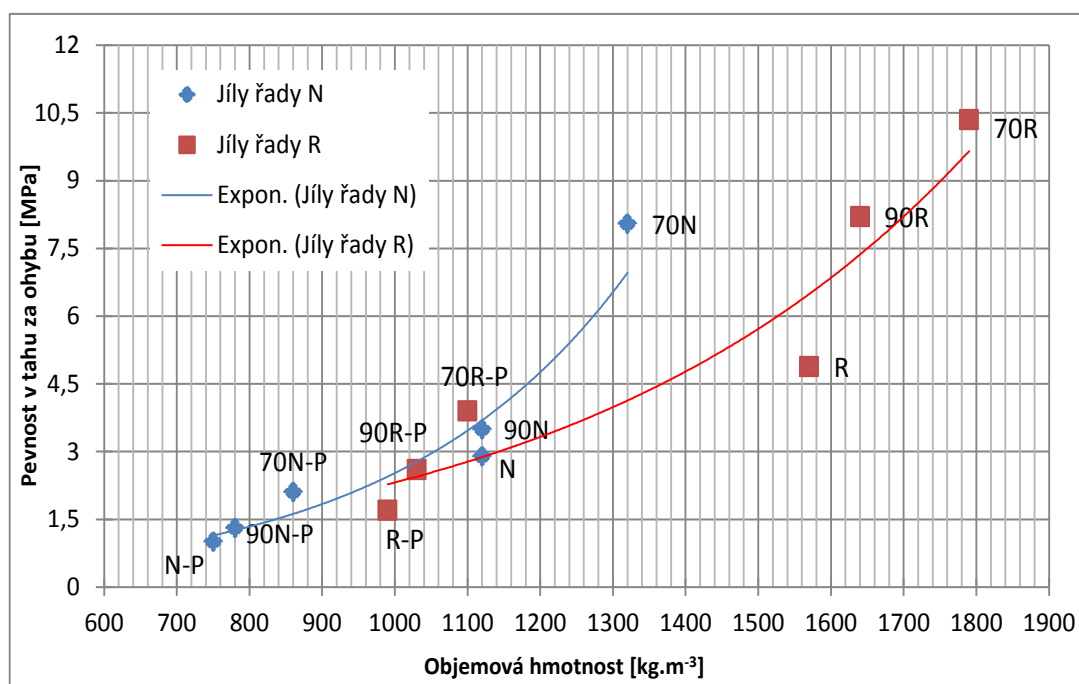
Vypalovací teplota	Objemová hmotnost [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]					
	R-P	90R-P	70R-P	R	90R	70R
850°C	960	1040	1270	1470	1540	1620
950°C	990	1030	1100	1570	1640	1790
1050°C	1070	1100	1250	1800	1900	2040
1150°C	1130	1170	1260	1840	1970	2100



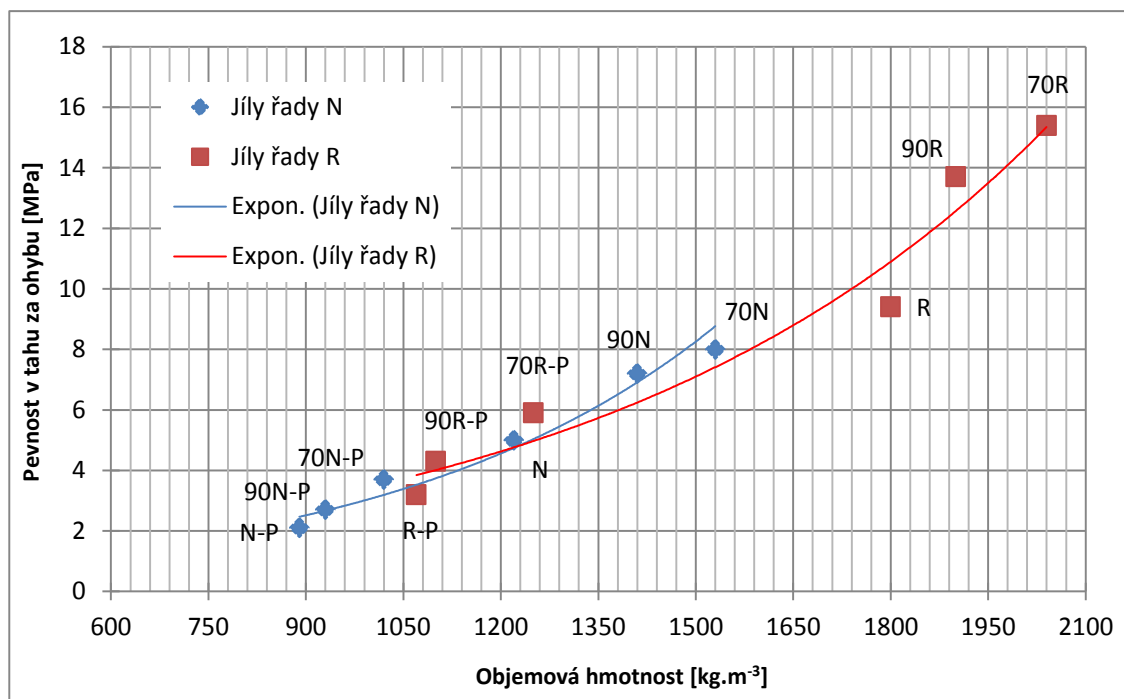
**Obr. 34** Grafické znázornění objemové hmotnosti těles



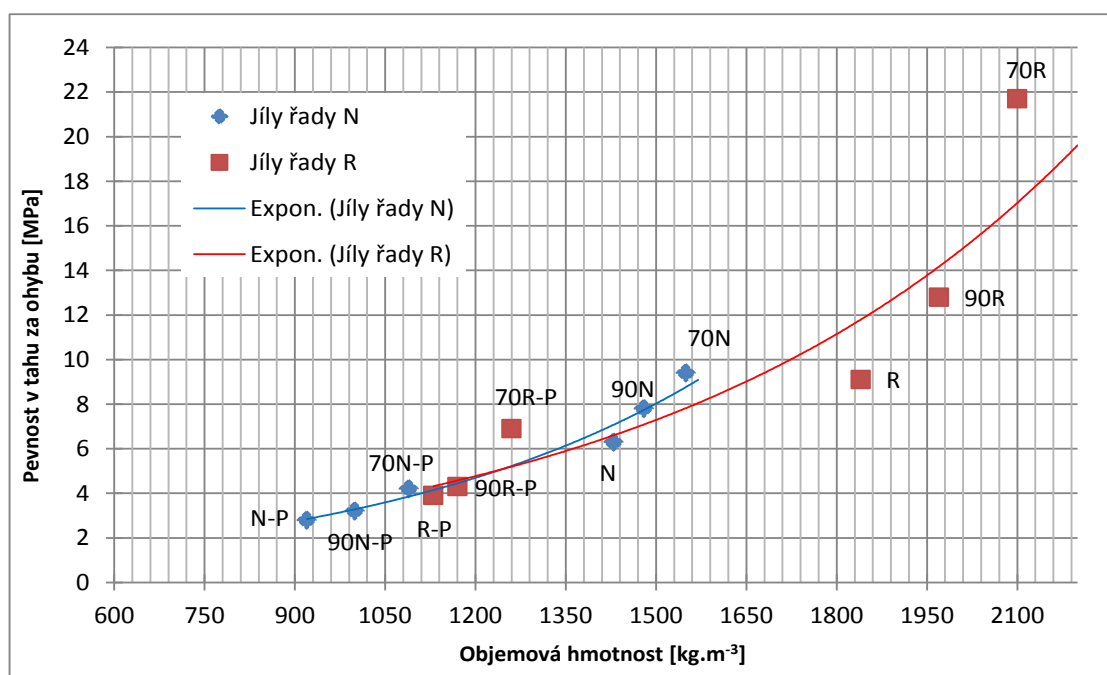
**Obr. 35** Závislost pevnosti v tahu za ohybu na objemové hmotnosti zkušebních těles při výpalu na 850 °C



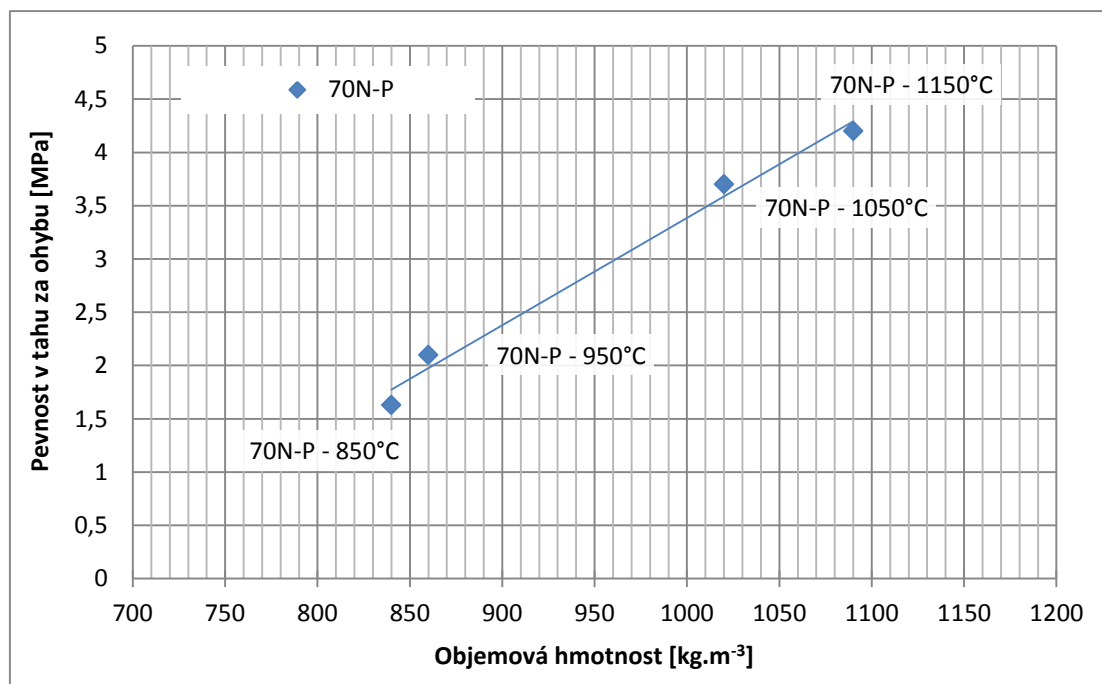
**Obr. 36** Závislost pevnosti v tahu za ohybu na objemové hmotnosti zkušebních těles při výpalu na 950 °C



**Obr. 37** Závislost pevnosti v tahu za ohybu na objemové hmotnosti zkušebních těles při výpalu na 1050 °C



**Obr. 38** Závislost pevnosti v tahu za ohybu na objemové hmotnosti zkušebních těles při výpalu na 1150 °C



**Obr. 39** Závislost pevnosti v tahu za ohybu na objemové hmotnosti pro recepturu 70N-P při všech vypalovacích teplotách

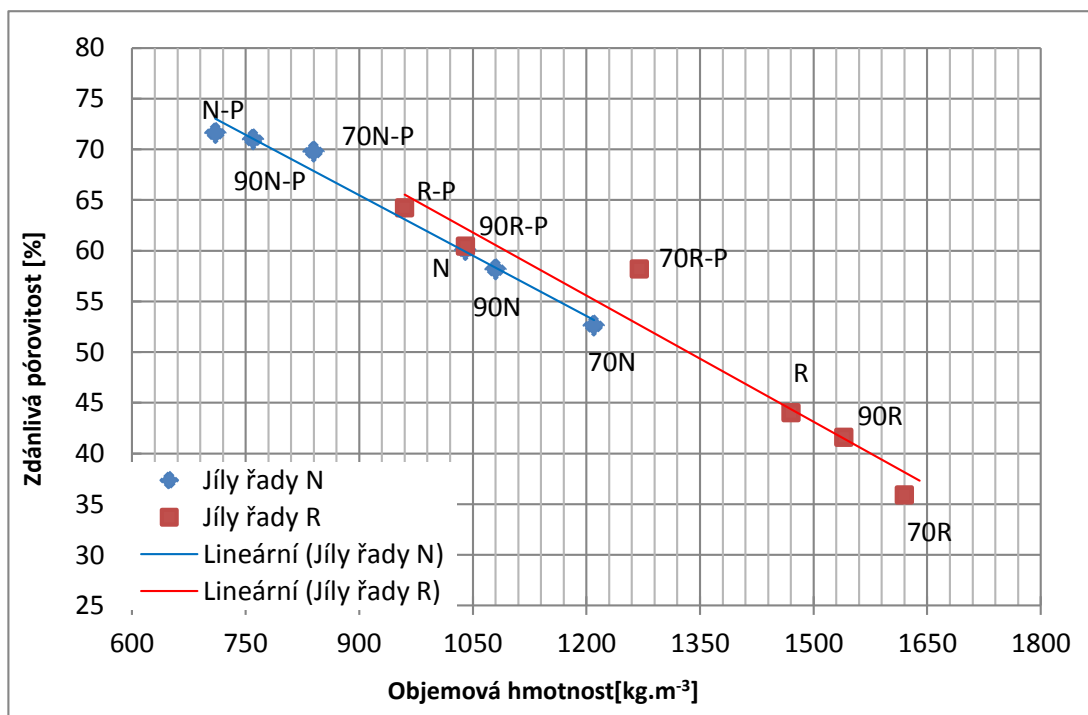
Zdánlivá pórovitost je stanovena v tabulce 18 a 19 a její hodnota je jedním z parametrů pro mechanické pevnosti zkušebních těles. Závislost zdánlivé pórovitosti na objemové hmotnosti je na obrázcích 40 až 43.

**Tab. 18** Zdánlivá pórovitost těles obsahujících jíl HC/N

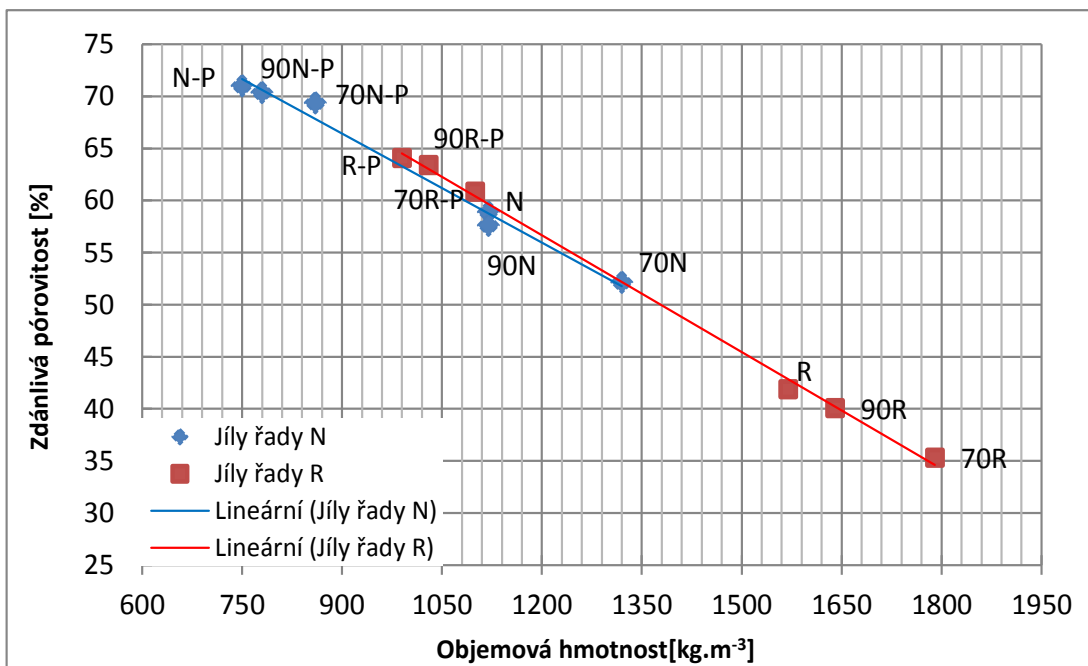
Vypalovací teplota	Zdánlivá pórovitost [%]					
	N-P	90N-P	70N-P	N	90N	70N
850°C	71,6	71,0	69,8	60,1	58,2	52,6
950°C	71,0	70,4	69,4	58,9	57,6	52,1
1050°C	66,0	65,3	61,2	52,6	45,5	38,2
1150°C	70,7	64,1	57,5	42,3	38,9	29,3

**Tab. 19** Zdánlivá pórovitost těles obsahujících jíl HC/R

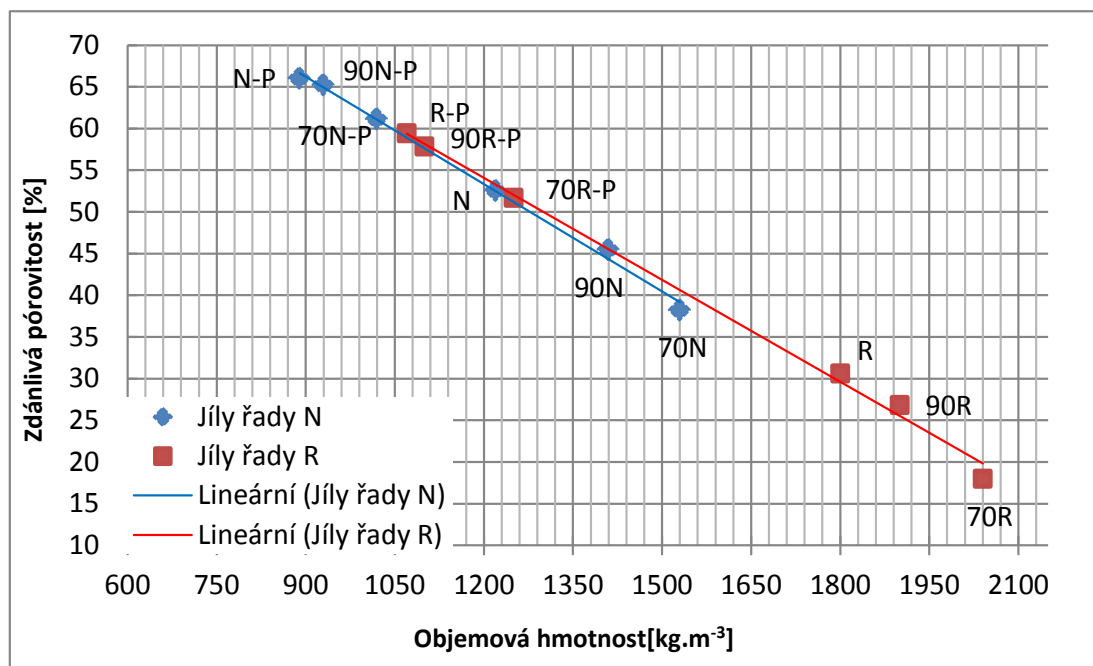
Vypalovací teplota	Zdánlivá pórovitost [%]					
	R-P	90R-P	70R-P	R	90R	70R
850°C	64,2	60,4	58,2	44,0	41,6	35,9
950°C	64,1	63,4	60,8	41,9	40,1	35,3
1050°C	59,5	57,9	51,7	30,6	26,8	18,0
1150°C	59,2	58,2	52,1	30,8	26,2	12,8



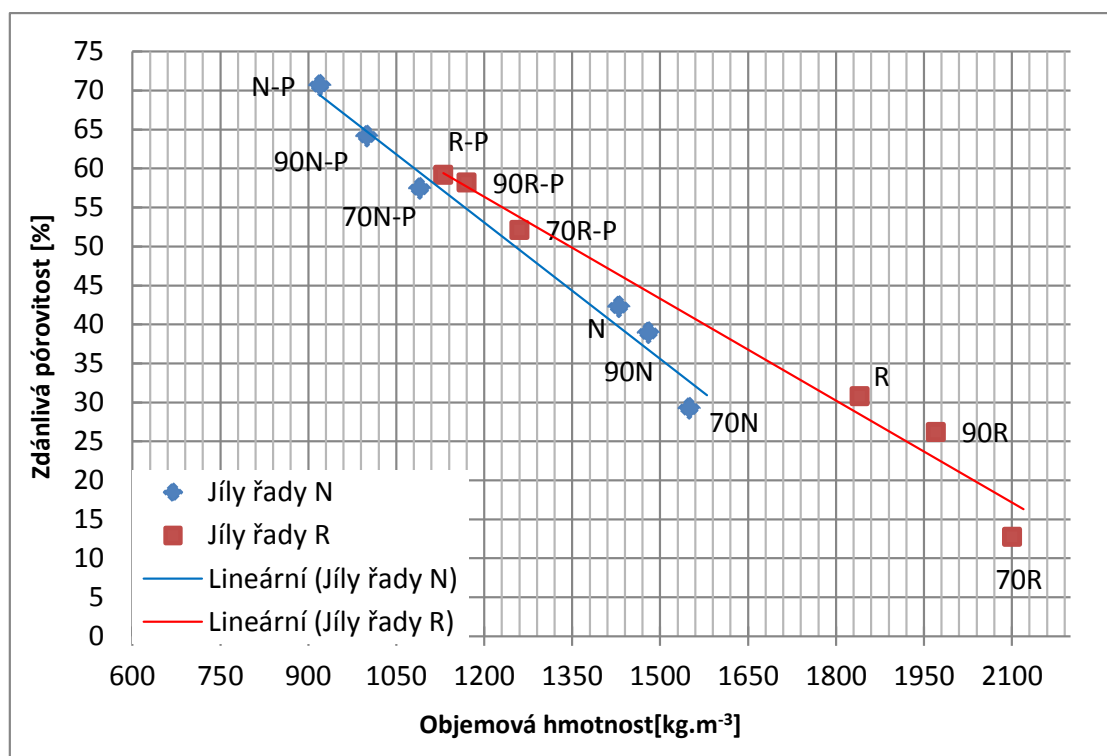
**Obr. 40** Závislost zdánlivé pórovitosti na objemové hmotnosti pro zkušební tělesa vypálená na teplotu 850 °C



**Obr. 41** Závislost zdánlivé pórovitosti na objemové hmotnosti pro zkušební tělesa vypálená na teplotu 950 °C



**Obr. 42** Závislost zdánlivé pórovitosti na objemové hmotnosti pro zkušební tělesa vypálená na teplotu 1050 °C



**Obr. 43** Závislost zdánlivé pórovitosti na objemové hmotnosti pro zkušební tělesa vypálená na teplotu 1150 °C

Další testovanou vlastností je zdánlivá hustota, která je stanovena v tabulkách 20 a 21.

**Tab. 20** Zdánlivá hustota pro tělesa s obsahem HC/N

Vypalovací teplota	Zdánlivá hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]					
	N-P	90N-P	70N-P	N	90N	70N
850°C	2500	2630	2770	2600	2570	2560
950°C	2560	2610	2810	2730	2720	2750
1050°C	2630	2670	2630	2590	2590	2490
1150°C	3130	2780	2560	2470	2610	2190

**Tab. 21** Zdánlivá hustota pro tělesa s obsahem HC/R

Vypalovací teplota	Zdánlivá hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]					
	R-P	90R-P	70R-P	R	90R	70R
850°C	2720	2690	2630	2630	2640	2530
950°C	2770	2800	2800	2710	2730	2760
1050°C	2630	2620	2600	2600	2600	2490
1150°C	2760	2790	2730	2650	2670	2410

### 3.9.7 Nasákavost

Nasákavost byla vypočítána ze vzorce uvedeného v kapitole 3.8.5. Hodnoty nasákavostí pro jednotlivá zkušební tělesa jsou uvedeny v tabulkách 22 a 23 a závislost nasákavosti na zdánlivé pórovitosti je na obrázku 44. Tato závislost se většinou neurčuje, ale zde je přítomna, aby bylo znázorněno, že tyto charakteristiky vycházejí z podobných matematických vztahů a musí být tedy závislé.

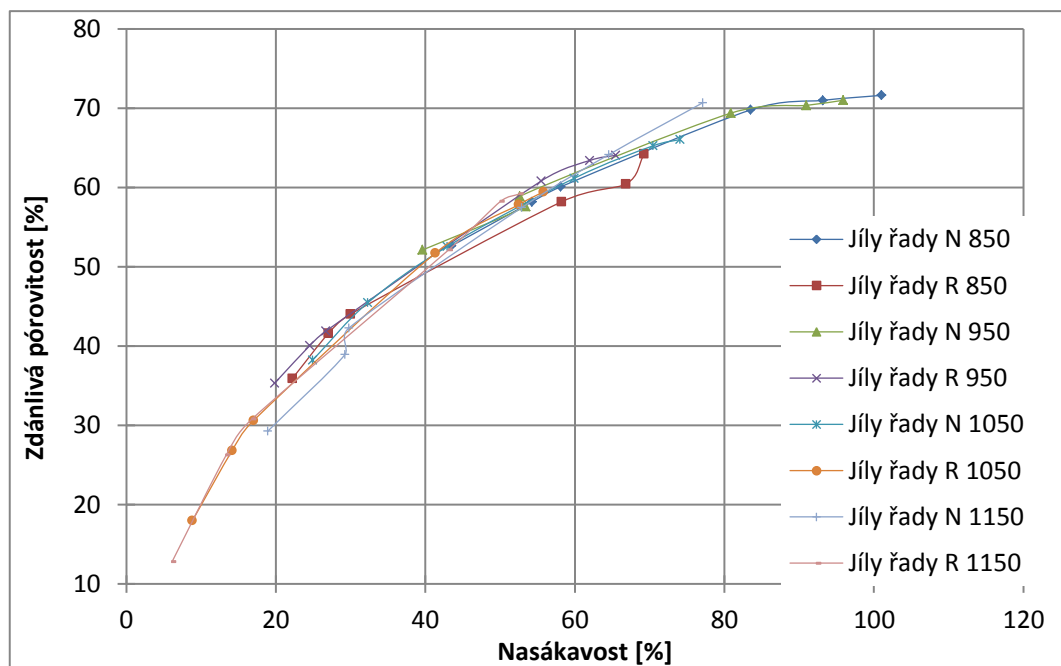
**Tab. 22** Nasákavost zkušebních těles obsahujících jíl HC/N

Vypalovací teplota	Nasákavost [%]					
	N-P	90N-P	70N-P	N	90N	70N
850°C	101,0	93,2	83,5	58,1	54,2	43,5
950°C	95,9	91,0	80,9	52,6	53,4	39,6
1050°C	74,0	70,4	59,9	42,9	32,3	24,9
1150°C	77,1	64,5	52,9	29,8	29,2	18,9

**Tab. 23** Nasákavost zkušebních těles obsahujících jíl HC/R

Vypalovací teplota	Nasákavost [%]					
	R-P	90R-P	70R-P	R	90R	70R
850°C	69,3	66,8	58,2	30,0	27,0	22,2
950°C	65,5	62,0	55,5	26,7	24,5	19,8
1050°C	55,8	52,5	41,3	17,0	14,2	8,8
1150°C	52,6	50,0	43,1	16,8	13,3	6,1





Obr. 44 Závislost nasákavosti na zdánlivé pórovitosti

### 3.9.8 Stanovení součinitele tepelné vodivosti $\lambda$

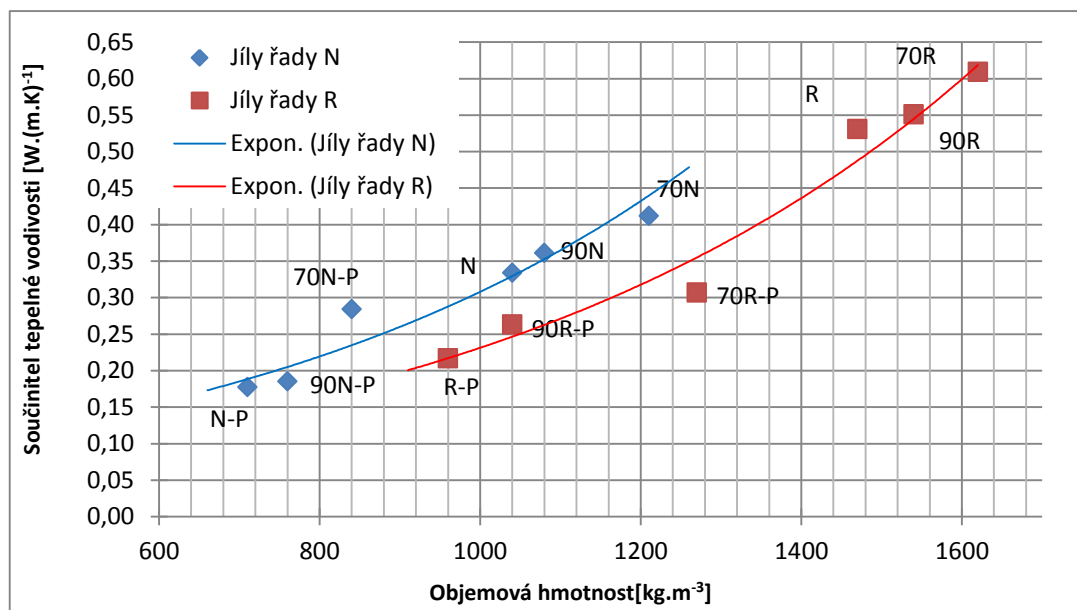
Součinitel tepelné vodivosti je pro zkušební tělesa z plastického těsta stanoven v tabulkách 24 a 25. Tato hodnota byla měřena pouze pro tělesa vypálená na teplotu 850 °C a 950 °C, u kterých se předpokládala nejlepší hodnota tohoto parametru. Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti lze pozorovat na obrázcích 45 a 46.

Tab. 24 Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro směsi s obsahem HC/N

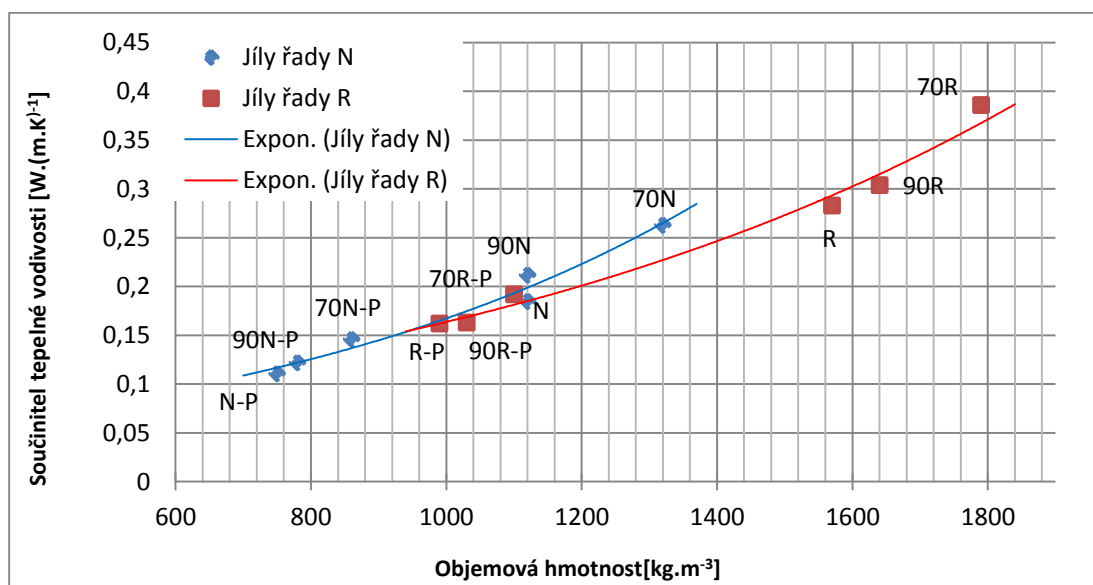
Vypalovací teplota	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W/(m.K)]					
	N-P	90N-P	70N-P	N	90N	70N
850°C	0,178	0,185	0,284	0,334	0,361	0,412
950°C	0,111	0,122	0,146	0,185	0,212	0,263

Tab. 25 Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro směsi s obsahem HC/R

Vypalovací teplota	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W/(m.K)]					
	R-P	90R-P	70R-P	R	90R	70R
850°C	0,217	0,263	0,307	0,531	0,551	0,609
950°C	0,162	0,163	0,192	0,283	0,304	0,386



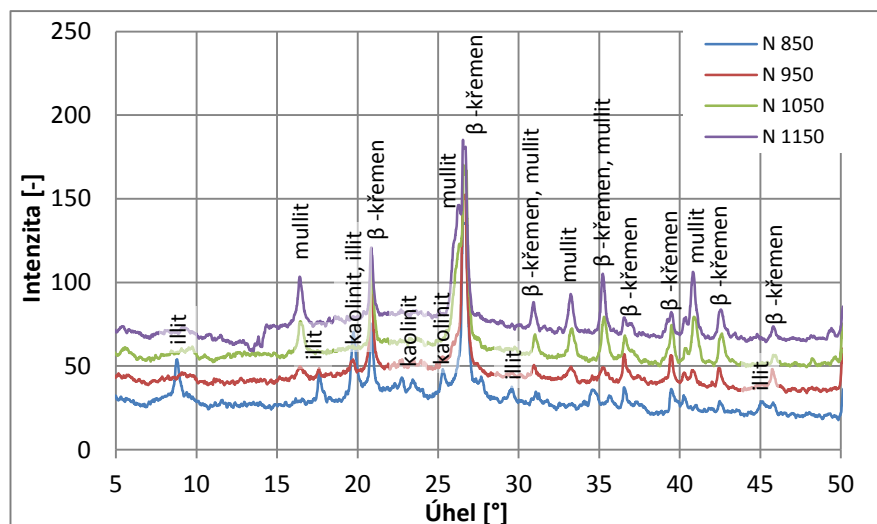
**Obr. 45** Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti pro tělesa vypálená na 850 °C



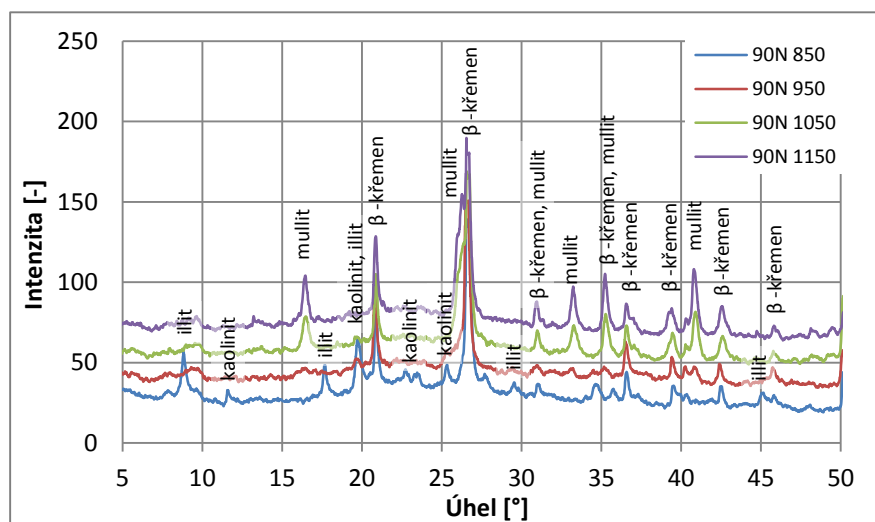
**Obr. 46** Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti pro tělesa vypálená na 950 °C

### 3.9.9 Mineralogické složení RTG - difrakční analýzou

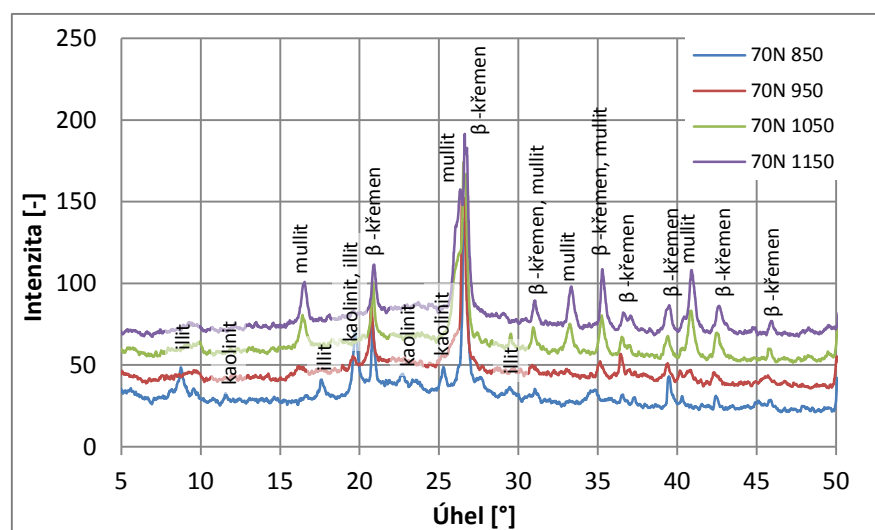
Zkušební tělesa byla posuzována vizuálním způsobem z vytvořených difraktogramů (grafy RTG analýz jsou na obrázcích 47 až 52). Z těchto grafů byly zjištěny obsažené minerály. Stejně jako v kapitole „Použité suroviny“, byly jednotlivé křivky navzájem posunuty o hodnotu 15 jednotek intenzity pro lepší čitelnost a přehlednost.



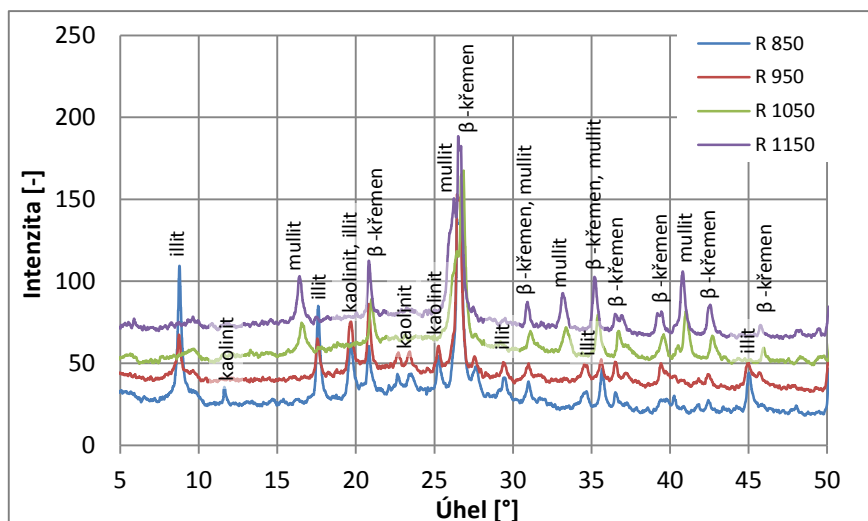
Obr. 47 RTG - difrakční analýza receptury N



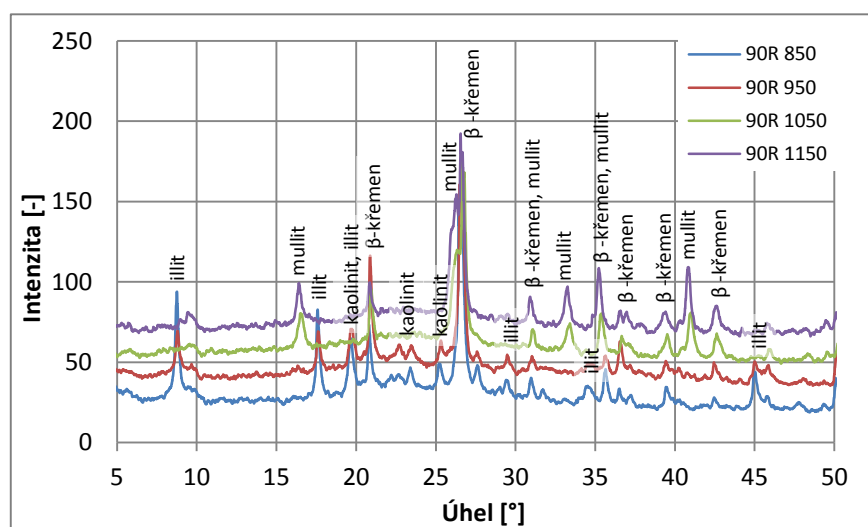
Obr. 48 RTG - difrakční analýza receptury 90N



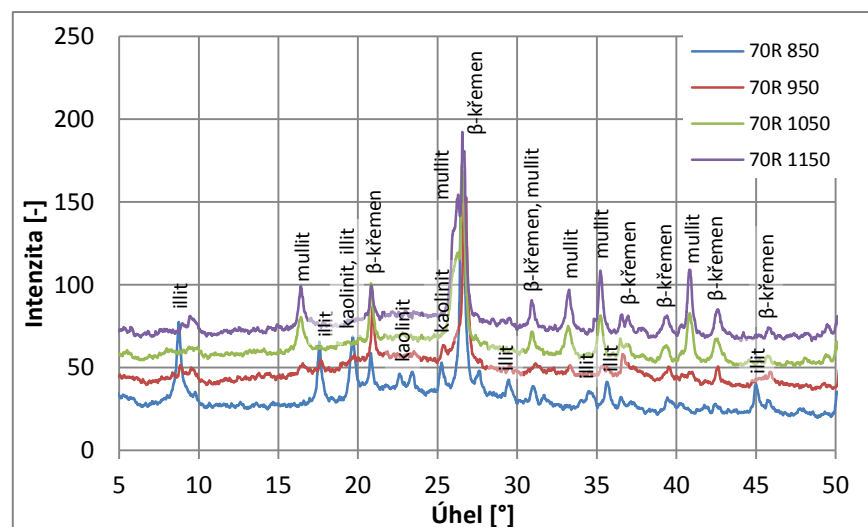
Obr. 49 RTG - difrakční analýza receptury 70N



**Obr. 50** RTG - difrakční analýza receptury R



**Obr. 51** RTG - difrakční analýza receptury 90R



**Obr. 52** RTG - difrakční analýza receptury 70R

### 3.9.10 Stanovení distribuce pórů

Zkušební tělesa pro tuto zkoušku byla vybrána na základě obr. 40 až 43. Jednalo se o vzorky s obsahem jílu HC/N a to:

- 70N, 70N-P a 90N pro teplotu 850 °C (viz str. 40, tab. 8)
- 70N, 70N-P, N, N-P pro teplotu 950 °C

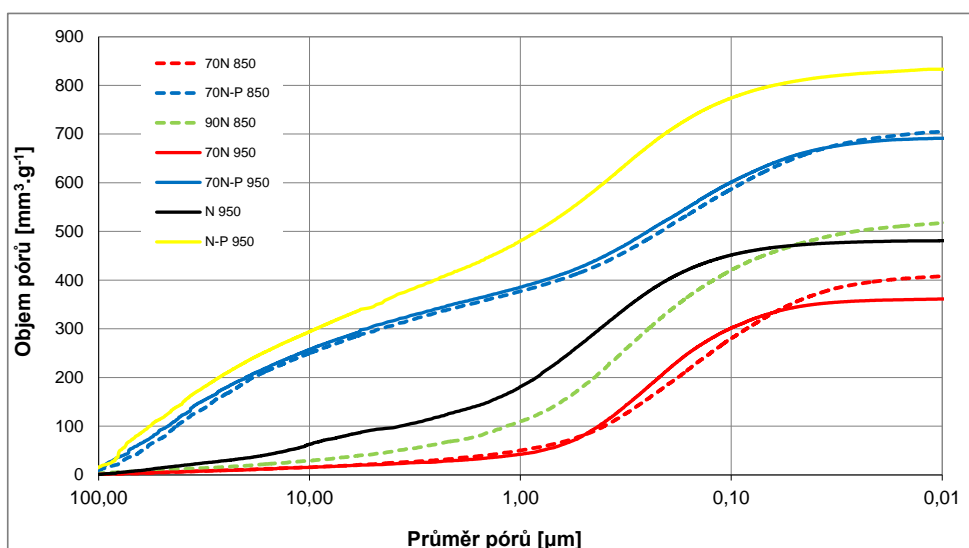
Pro teplotu 850 °C nebyly zkoušeny vzorky N a N-P kvůli jejich nízké pevnosti. Vzorek 90N 850 °C byl testován kvůli nejlepšímu výsledku v optimalizačním výpočtu (viz diskuse výsledků níže). Měření proběhlo metodou vysokotlaké rtuťové porozimetrie a výsledky byly porovnávány s výsledky stanovenými hydrostatickým vážením. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 26 a 27. Zkratka „POR“ značí výsledky z porozimetrie, zkratka „HYD“ výsledky z hydrostatického vážení.

**Tab. 26** Výsledky vysokotlaké porozimetrie pro tělesa vypálená na 850 °C

Označení	Teplota výpalu	Zdánlivá pórovitost [%]		Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]		Zdánlivá hustota [%]	
		POR	HYD	POR	HYD	POR	HYD
70N	850 °C	50,588	52,6	1240	1210	2510	2560
70N-P		63,449	69,8	900	840	2460	2770
90N		54,389	58,2	1090	1080	2240	2570

**Tab. 27** Výsledky vysokotlaké porozimetrie pro tělesa vypálená na 950 °C

Označení	Teplota výpalu	Zdánlivá pórovitost [%]		Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]		Zdánlivá hustota [%]	
		POR	HYD	POR	HYD	POR	HYD
70N	950 °C	48,102	52,1	1330	1320	2560	2750
70N-P		64,184	69,4	930	860	2600	2810
N		56,641	58,9	1180	1120	2720	2730
N-P		67,654	71	810	750	2510	2560



**Obr. 53** Křivky distribuce pórů

### 3.10 Diskuse výsledků části A

Zkušební tělesa vyráběná technologií z plastického těsta, byla navržena ze dvou základních pórovinových jílu. Jednalo se o jíly HC/N a HC/R. Výsledky testů prováděných na pracovní hmotě, ukázaly, že hmota obsahující jíl HC/R potřebuje méně vody k dosažení optimální rozdělovací konzistence. S přidavkem vysušených pilin se pak potřeba vody samozřejmě zvýšila stejně jako s přidavkem jílu B1.

Zkouška citlivosti k sušení metodou podle Bigota určila, že receptury obsahující jíl HC/R jsou obecně k sušení citlivější méně než s obsahem HC/N.

Smrštění sušením je větší u receptur s obsahem jílu HC/N (čistý HC/N smrštění 3,4 %). S přidavkem jílu B1 se smrštění sušením zvyšuje. Naopak piliny působí ve zkušebních tělesech před vypálením jako ostřívo, takže smrštění snižují.

Při testování smrštění pálením zkušební tělesa ve většině případů (vyjímkou byla tělesa označená N a 70N) při výpalu na 850 °C nabývala na délce. Nejnižší smrštění pálením bylo možno sledovat u receptury 90N pro 850 °C (0 %). Jedná se o relativně nízkou vypalovací teplotu a délkové změny byly proto menší. Nejnižší celkové smrštění bylo naměřeno pro všechny vypalovací teploty u receptury R-P.

Pevnost v tahu za ohybu se podle předpokladů výrazně zlepšovala jak se zvýšeným obsahem jílu B1, tak s vyšší vypalovací teplotou. Je to dáno lepším slínutím vazného jílu B1, u kterého již se již při teplotách 1050 a 1150 °C tvoří určité množství minerálu mullit, který má vysoké pevnosti. Z obr. 35-38 plyne, že z použitých surovin lze dosáhnout při objemové hmotnosti  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$  pevnosti v tahu za ohybu cca 1,5 - 3,5 MPa. Všechna tělesa měla i při nejnižší vypalovací teplotě 850 °C pevnost v tahu za ohybu alespoň 1 MPa.

Objemová hmotnost se na rozdíl od pevnosti s přidavkem vazného slínavého jílu B1 zvyšovala. Stejně tak jako s vyšší teplotou. Objemová hmotnost byla nejnižší u receptury N-P ( $710 \text{ kg.m}^{-3}$  pro vypalovací teplotu 850 °C a  $920 \text{ kg.m}^{-3}$  pro vypalovací teplotu 1150 °C). Je to dáno tím, že jíl HC/N obsahuje velké množství spalitelných látek a má vysokou ztrátu žháním.

Zdánlivá pórovitost se snižovala s přidavkem vazného slínavého jílu B1 a nejnižší byla pro každou teplotu u receptur nelehčených pilinami s obsahem 30 % B1. Větší pórovitost byla zjištěna u receptur s obsahem jílu HC/N (receptura N-P 71,6 % při 850 °C, receptura R-P 64,2 % při 850 °C).

Vysokotlaková rtuťová porozimetrie nám dala možnost porovnat pórovitosti z porozimetru a hydrostatickým vážením. U žádného tělesa nebyl tento rozdíl větší než 6 %. Obrázek 53 ukazuje, že piliny homogenizovaly hmotu, zvyšovaly pórovitost a tělesa s pilinami měla póry všech velikostí v přibližně stejném množství. Při použití pilin se neprojevil vliv vypalovací teploty na celkovou pórovitost (zkušební tělesa 70N-P\_850 a 950, viz obrázek 53) a objevily se větší póry (10 - 100  $\mu\text{m}$ ). Tělesa bez pilin měla nejvíce pórů střední velikosti (cca 0,7 - 0,07  $\mu\text{m}$ ). Tato zkouška potvrdila, že přidavek jílu B1 (stejně jako vyšší vypalovací teplota) pórovitost snižoval a narůstal obsah malých pórů na úkor větších.

Nasákavost se s vypalovací teplotou i přidavkem vazného slínavého jílu snižovala (z důvodu lepšího slinutí). Např. pro tělesa s jílem HC/R se z 69,3 % (R-P na teplotu 850 °C) snížila až na 6,1 % (70R na teplotu 1150 °C).

Součinitel tepelné vodivosti je závislý na objemové hmotnosti jak je vidět na obrázku 45. Tělesa s obsahem jílu HC/N mají při stejné objemové hmotnosti a teplotě 850 °C vyšší  $\lambda$  než u HC/R z důvodu nižší teploty potřebné pro slinutí. Při 950 °C už se hodnoty vyrovnávají. Měření proběhlo pouze pro teploty 850 a 950 °C, u kterých se díky nejnižším objemovým hmotnostem předpokládal také nejnižší součinitel tepelné vodivosti. Při slinutí střepu by se měla tepelná vodivost zvyšovat, což se však v tomto případě nestalo a nižší tepelná vodivost byla naopak zjištěna u těles pálených na vyšší vypalovací teplotu (950 °C). Je to pravděpodobně způsobeno modifikací a tvorbou nových minerálů s nižšími hodnotami součinitele tepelné vodivosti. Proto byla provedena následně RTG-difrakční analýza. S přidavkem jílu B1 se tepelně izolační vlastnosti pochopitelně opět zhoršovaly, protože se snižovala pórovitost střepu. V tomto ohledu lepší (celkově nižší hodnoty  $\lambda$ ), se ukázaly být receptury obsahující jíl HC/N. Výsledky RTG-difrakční analýzy byly shrnuty do přehledné tabulky 29.

**Tab. 28** Legenda k tab. 29

Označení	Obsažené množství minerálu
0	neobsahuje
X	malý obsah
XX	středně velký obsah
XXX	velký obsah

**Tab. 29** Obsah minerálů

Označení	Vyp. tepl. [°C]	β-křemen	illit	kaolinit	mullit
N	850	XXX	X	X	0
	950	XX	0	X	0
	1050	XX	0	0	X
	1150	X	0	0	X
90N	850	XX	X	X	0
	950	XX	0	0	0
	1050	XX	0	0	X
	1150	X	0	0	X
70N	850	XX	X	X	0
	950	XX	0	X	0
	1050	X	0	0	X
	1150	X	0	0	XX
R	850	XX	XX	XX	0
	950	XX	X	X	0
	1050	XX	0	0	X
	1150	X	0	0	X
90R	850	XX	XX	XX	0
	950	XX	X	X	0
	1050	X	0	0	X
	1150	X	0	0	X
70R	850	XX	X	X	0
	950	X	0	X	0
	1050	X	0	0	X
	1150	X	0	0	XX

Z tabulky 29 je patrné, že ve zkušebních tělesech jsou obsaženy pouze čtyři minerály. Jedná se o křemen, illit, kaolinit a mullit. Množství minerálu je ohodnoceno počtem křížků jak je vysvětleno v tabulce 28. Receptury obsahující jíl HC/N měly vyšší množství β-křemene, naopak vyskytovalo se zde méně illitu a kaolinitu. Illit i kaolinit ve všech recepturách s přibývajícím teplotou mizely a byly nahrazovány vznikajícím mullitem, jehož zárodky se začaly tvořit již při 1050 °C. Také β-křemen postupně ubýval. Součinitel tepelné vodivosti se tedy i přes vyšší slinutí keramického střepu se snižujícím obsahem těchto minerálů také snižoval.



## Optimalizační výpočet

Optimalizace zkušebních těles vyráběných technologií z plastického těsta byla provedena kvantitativním párovým srovnáním pomocí Sattyho matice. Z toho důvodu, že cílem bylo snížení nákladů na výrobu, byl výpočet omezen pouze na teploty 850 °C a 950 °C. Byly hodnoceny tyto parametry: 1 - objemová hmotnost, 2 - pevnost v tahu za ohybu, 3 - nasákavost, 4 - součinitel tepelné vodivosti, 5 - smrštění pálením, 6 - práce s materiálem, 7 - cena. Nejvyšší prioritu pro nás měly tepelně izolační vlastnosti (součinitel tepelné vodivosti) a cena.

Tělesa byla rozdělena podle jílů a pro HC/N označena takto: A) N-P 850, B) 90N-P 850, C) 70N-P 850, D) N850, E) 90N 850, F) 70N 850, G) N-P 950, H) 90N-P 950, I) 70N-P 950, J) N 950, K) 90N 950, L) 70N 950.

Pro receptury s obsahem HC/R potom takto: : M) R-P 850, N) 90R-P 850, O) 70R-P 850, P) R 850, Q) 90R 850, R) 70R 850, S) R-P 950, T) 90R-P 950, U) 70R-P 950, V) R 950, W) 90R 950, X) 70R 950.

Hodnoty parametrů 1-5 byly zjištěny měřením, parametry 6 a 7 byly zjištěny odborným odhadem (u ceny byla brána v potaz vypalovací teplota a cena surovin)

**Tab. 30** Hodnocené parametry

Číslo	Označení parametrů	Jednotka	Optimum
1	Objemová hmotnost	[kg.m <sup>-3</sup> ]	MIN
2	Pevnost v tahu za ohybu	[MPa]	MAX
3	Nasákavost	[%]	MIN
4	Součinitel tepelné vodivosti	[W.(m.K) <sup>-1</sup> ]	MIN
5	Smrštění pálením	[%]	MIN
6	Pracnost	[-]	MIN
7	Cena	[kč/jednotka]	MIN

**Tab. 31** Sattyho matice

↓j; i→	1	2	3	4	5	6	7	$S_i [\prod s_{ij}]$	$R_i [(s_{ij})^{1/n}]$	$F_i [R/\sum R]$
1	1	1	3	1/3	3	4	1/3	4,000	1,219	0,13821
2	1	1	2	1/3	3	4	1/3	2,667	1,150	0,13043
3	1/3	1/2	1	1/4	1	2	1/4	0,021	0,575	0,06521
4	3	3	4	1	3	5	1/2	270,003	2,225	0,25227
5	1/3	1/3	1	1/3	1	2	1/3	0,025	0,589	0,06681
6	1/4	1/4	1/2	1/5	1/2	1	1/5	0,001	0,349	0,03952
7	3	3	4	2	3	5	1	1081,081	2,713	0,30756
								1357,7968	8,820	1

**Tab. 32** Označení receptur v optimalizačních tabulkách

Ozn.	Název	Vyp. Tep. [°C]	Ozn.	Název	Vyp. Tep. [°C]
A	N - P	850	M	R - P	850
B	90N-P		N	90R-P	
C	70N-P		O	70R-P	
D	N		P	R	
E	90N		Q	90R	
F	70N		R	70R	
G	N - P	950	S	R - P	950
H	90N-P		T	90R-P	
I	70N-P		U	70R-P	
J	N		V	R	
K	90N		W	90R	
L	70N		X	70R	

**Tab. 33** Hodnoty  $a_{ij}$  pro receptury A - L

Parametry	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Optimum
1	710	760	840	1040	1080	1210	750	780	860	1120	1120	1320	Min
2	1,0	1,0	1,6	2,0	3,0	6,1	1,0	1,3	2,1	2,9	3,5	8,0	Max
3	101	93,2	83,5	58,1	54,2	43,5	95,9	91	80,9	52,6	53,4	39,6	Min
4	0,178	0,185	0,284	0,334	0,361	0,412	0,111	0,122	0,146	0,185	0,212	0,263	Min
5	0,2	0,3	0,7	0,2	0	0,4	0,9	0,3	1,3	1,1	0,9	2,3	Min
6	3	3	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	Min
7	2	2	2	1	1	1	4	4	4	3	3	3	Min

**Tab. 34** Hodnoty  $a_{ij}$  pro receptury M - X

Parametry	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Optimum
1	960	1040	1270	1470	1540	1620	990	1040	1100	1570	1640	1790	Min
2	1,3	1,8	2,3	2,6	4,5	6,2	1,7	2,6	3,9	4,9	8,2	10,4	Max
3	69,3	66,8	58,2	30	27	22,2	65,5	62	55,5	26,7	24,5	19,8	Min
4	0,217	0,263	0,307	0,531	0,551	0,609	0,162	0,163	0,192	0,283	0,304	0,386	Min
5	1	1,1	0,9	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,9	0,5	0,3	0,6	Min
6	3	3	3	1	1	1	3	3	3	1	1	1	Min
7	2	2	2	1	1	1	4	4	4	3	3	3	Min

Do rozhodovací matice byly hodnoty převedeny pomocí vzorců:

$$\text{MIN } b_{ij} = \frac{(\max a_{ij}) - a_{ij}}{(\max a_{ij}) - (\min a_{ij})}$$

$$\text{MAX } b_{ij} = \frac{a_{ij} - (\min a_{ij})}{(\max a_{ij}) - (\min a_{ij})}$$

**Tab. 35** Rozhodovací matice  $b_{ij}$  pro receptury A - L

Parametry	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	$F_i [R/\Sigma R]$
1	1	0,954	0,88	0,694	0,657	0,537	0,963	0,935	0,861	0,62	0,62	0,435	0,138207
2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,5	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,8	0,130429
3	0	0,096	0,216	0,528	0,576	0,708	0,063	0,123	0,248	0,596	0,586	0,756	0,065214
4	0,865	0,851	0,653	0,552	0,498	0,396	1	0,978	0,93	0,851	0,797	0,695	0,252266
5	0,913	0,87	0,696	0,913	1	0,826	0,609	0,87	0,435	0,522	0,609	0	0,066807
6	0	0	0	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0,5	0,5	0,5	0,039517
7	0,667	0,667	0,667	1	1	1	0	0	0	0,333	0,333	0,333	0,307559

**Tab. 36** Rozhodovací matice  $b_{ij}$  pro receptury M - X

Parametry	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	$F_i [R/\Sigma R]$
1	0,769	0,694	0,481	0,296	0,231	0,157	0,741	0,694	0,639	0,204	0,139	0	0,138207
2	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	1,0	0,130429
3	0,39	0,421	0,527	0,874	0,911	0,97	0,437	0,48	0,56	0,915	0,942	1	0,065214
4	0,787	0,695	0,606	0,157	0,116	0	0,898	0,896	0,837	0,655	0,612	0,448	0,252266
5	0,565	0,522	0,609	0,652	0,739	0,826	0,913	0,957	0,609	0,783	0,87	0,739	0,066807
6	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0,039517
7	0,667	0,667	0,667	1	1	1	0	0	0	0,333	0,333	0,333	0,307559

Výpočet do tabulky  $c_{ij}$  byl proveden pomocí Sattyho matice podle vzorce:

$$C_{ij} = F_i \cdot b_{ij} \cdot 100$$

**Tab. 37** Optimalizační výpočet pro receptury A - L

Cij	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	0,138	0,132	0,122	0,096	0,091	0,074	0,133	0,129	0,119	0,086	0,086	0,060
2	0	0	0,009	0,014	0,029	0,071	0,001	0,005	0,016	0,027	0,035	0,098
3	0	0,006	0,014	0,034	0,038	0,046	0,004	0,008	0,016	0,039	0,038	0,049
4	0,218	0,215	0,165	0,139	0,126	0,100	0,252	0,247	0,235	0,215	0,201	0,175
5	0,061	0,058	0,046	0,061	0,067	0,055	0,041	0,058	0,029	0,035	0,041	0
6	0	0	0	0,020	0,020	0,020	0	0	0	0,020	0,020	0,020
7	0,205	0,205	0,205	0,308	0,308	0,308	0	0	0	0,103	0,103	0,103
	0,623	0,616	0,561	0,672	<b>0,677</b>	0,674	0,431	0,447	0,415	0,523	0,523	0,505

**Tab. 38** Optimalizační výpočet pro receptury M - X

Cij	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1	0,106	0,096	0,067	0,041	0,032	0,022	0,102	0,096	0,088	0,028	0,019	0
2	0,004	0,012	0,018	0,023	0,049	0,072	0,010	0,023	0,041	0,055	0,101	0,130
3	0,025	0,027	0,034	0,057	0,059	0,063	0,029	0,031	0,037	0,060	0,061	0,065
4	0,199	0,175	0,153	0,040	0,029	0	0,226	0,226	0,211	0,165	0,155	0,113
5	0,038	0,035	0,041	0,044	0,049	0,055	0,061	0,064	0,041	0,052	0,058	0,049
6	0	0	0	0,040	0,040	0,040	0	0	0	0,040	0,040	0,040
7	0,205	0,205	0,205	0,308	0,308	0,308	0	0	0	0,103	0,103	0,103
	0,577	0,550	0,518	0,551	0,566	0,559	0,429	0,440	0,418	0,502	0,536	0,500

**Závěr optimalizačního výpočtu:**

Jako optimální receptura byla optimalizačním výpočtem pomocí kvantitativního párového srovnání Sattyho maticí vybrána receptura 90N (90 % HC/N + 10 % B1) pálená na vypalovací teplotu 850 °C. Tato receptura v žádném z hodnocených parametrů nebyla nejhorší, naopak měla nejnižší smrštění pálením (0 %) a také byla cenově příznivá (velkou roli hrálo to, že je pálena na pouhých 850 °C). Měla i relativně nízkou objemovou hmotnost ( $1080 \text{ kg.m}^{-3}$ ) při solidní pevnosti v tahu za ohybu 3 MPa. Jedinou velkou nevýhodou je celkem vysoký součinitel tepelné vodivosti [ $0,361 \text{ W.(m.K)}^{-1}$ ], což by u tepelně izolačních žáromateriálů mohl být problém. Pokud pomineme tento nedostatek, lze tuto recepturu doporučit k použití. Pokud je potřeba lepších izolačních vlastností i za cenu menšího snížení mechanických pevností, je lépe použít jíl HC/N.

Z této práce vyplývá, že kombinace jílu má lepší vlastnosti než jíly čisté a tato kombinace se tedy doporučuje k průmyslovému použití.

## ČÁST B - Zkušební tělesa s lehčivou vyrobená lisováním ze zavhlé směsi

Práce byla zaměřena především na snížení surovinových nákladů, testování různých keramických vazeb (**část 1**) a jednalo se také o možnosti lehčení škvárou (**část 2**). Vyráběli a posuzovali jsme dvě skupiny izolačních žáromateriálů. Rozdělili jsme je na dvě části takto:

- Zkušební tělesa vyrobená technologií lisováním ze zavhlé směsi pro porovnávání různých keramických vazeb.
- Využití škváry pro výrobu izolačních materiálů s OH 1100 Kg.m<sup>-3</sup> a KT 1100 °C.

### ČÁST B1 - Porovnávání různých keramických vazeb

#### 3.11 Použité suroviny

Tělesa byla vytvořena z různých jíílů za účelem posouzení kvality keramické vazby a možnosti zlevnění výroby použitím škváry. Jednalo se o výrobky obsahující 75 % lehčiva (škváry) a 25 % keramické vazby. Dále tato skupina obsahovala 4 tělesa posuzující zlepšení kvality výrobků s nahrazením části škváry kvalitnějšími lehčivou (dinasový zlom, expandovaný perlit a Alo EX30) pro dosažení vyšších pevností.

##### 3.11.1 Plastické suroviny

Pro testování byly vybrány jíily **HC/N**, **HC/R**, **B1**, **BNV/B1**, **Wp**, **1574S** a kaolin **Sia**. V tabulce 39 je shrnuto chemické složení těchto surovin.

V tabulkách 40 až 47 jsou uvedeny zjištěné vlastnosti používaných plastických surovin (čistých jíílů) z různých lokálních zdrojů, po vytvoření zkušebních těles a vypálení na teploty 1000 °C, 1100 °C, 1200 °C, 1300 °C a 1400 °C. Je stanoveno optimální množství rozdělovací vody na surové směsi. Dále pak na vypálených tělesech délkové smrštění sušením a pálením, hmotnostní ztráty pálením, nasákavost a objemová hmotnost.

**Tab. 39** Chemické složení plastických surovin

Název suroviny	HC/N	HC/R	B1	BNV	BNV/B1	Wp	1574S	kaolin Sia
Dodavatel	Lassesberger	Lassesberger	Lassesberger / PD-Refractories	PD-Refractories	PD-Refractories	Keramost	Goerg & Schneider	Sedlecký kaolin
Možnosti použití	Žáromateriály, cihlářské výrobky							
Druh suroviny	žárovzdorný jíl							žárovzdorný kaolin
Ztráta žíháním (%)	21,29	8,72	11-14	14,77	13,73	8,59	6,38	13,89
Chem. složení [%]	SiO <sub>2</sub>	61,7	63,25	54-56	51,0	51,59	75,31	70,25
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,10	29,73	37-39	41,77	42,06	20,37	22,1
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,71	1,85	2,6-2,7	2,25	2,28	0,96	2,09
	TiO <sub>2</sub>	1,03	0,74	0,8-1,0	3,09	1,90	0,66	1,37
	CaO	0,54	0,08	0,78-0,79	0,42	0,22	0,10	0,14
	MgO	0,42	0,34	0,38-0,40	0,26	0,32	0,94	0,67
	Na <sub>2</sub> O	0,29	0,29	0,23-0,25	0,32	0,49	0,39	0,79
	K <sub>2</sub> O	2,81	3,32	2,2-2,4	0,49	1,14	0,92	2,25
								0,95

**Tab. 40** Vlastnosti jílu HC/N

HC/N	teplota výpalu [°C]	množ. rozděl. vody [%]	ztráta pálením [%]	DS [%]	DP [%]	NV [%]	OH [kg.m <sup>-3</sup> ]
	1000	50,4	21,5	6,4	6,7	61,9	1010
	1100	50,4	21,7	6,4	11,5	46,6	1190
	1200	50,4	21,9	6,4	15,7	30,8	1440
	1300	50,4	22	6,4	17,9	24,2	1580
	1400	50,4	22	6,4	18,1	21,0	1630

**Tab. 41** Vlastnosti jílu HC/R

HC/R	teplota výpalu [°C]	množ. rozděl. vody [%]	ztráta pálením [%]	DS [%]	DP [%]	NV [%]	OH [kg.m <sup>-3</sup> ]
	1000	39,0	8,9	6,0	6,1	30,7	1460
	1100	39,0	9,1	6,0	8,7	23,1	1660
	1200	39,0	9,3	6,0	11,3	16,6	1840
	1300	39,0	9,3	6,0	13,4	11,0	2030
	1400	39,0	9,4	6,0	13,8	4,0	2130

**Tab. 42** Vlastnosti jílu B1

B1	teplota výpalu [°C]	množ. rozděl. vody [%]	ztráta pálením [%]	DS [%]	DP [%]	NV [%]	OH [kg.m <sup>-3</sup> ]
	1000	44,2	10,8	9,1	12,3	19,3	1770
	1100	44,2	11,5	9,1	21,3	0,6	2370
	1200	44,2	11,5	9,1	19,8	0,1	2480
	1300	44,2	11,5	9,1	20,7	0,1	2470
	1400	44,2	11,6	9,1	18,9	4,3	2010

**Tab. 43** Vlastnosti jílu BNV

BNV	teplota výpalu [°C]	množ. rozděl. vody [%]	ztráta pálením [%]	DS [%]	DP [%]	NV [%]	OH [kg.m <sup>-3</sup> ]
	1000	34,8	15,2	7,1	10,5	26,7	1590
	1100	34,8	15,2	7,1	12,5	19,7	1790
	1200	34,8	15,2	7,1	19,2	8,5	2220
	1300	34,8	15,2	7,1	19,6	3,1	2370
	1400	34,8	15,2	7,1	20,1	1,2	2380

**Tab. 44** Vlastnosti jílu BNV/B1

BNV/B1	teplota výpalu [°C]	množ. rozděl. vody [%]	ztráta pálením [%]	DS [%]	DP [%]	NV [%]	OH [kg.m <sup>-3</sup> ]
	1000	40,0	12,5	9,3	11,7	21,0	1730
	1100	40,0	13,0	9,3	17,8	7,1	2220
	1200	40,0	13,1	9,3	19,2	0,2	2380
	1300	40,0	13,1	9,3	19,5	0,1	2390
	1400	40,0	13,1	9,3	17,1	5,4	2040

**Tab. 45** Vlastnosti jílu Wp

Wp	teplota výpalu [°C]	množ. rozděl. vody [%]	ztráta pálením [%]	DS [%]	DP [%]	NV [%]	OH [kg.m <sup>-3</sup> ]
	1000	36,1	8,3	8,9	9,0	25,3	1600
	1100	36,1	8,3	8,9	9,6	24,0	1630
	1200	36,1	8,3	8,9	12,1	20,3	1740
	1300	36,1	8,3	8,9	13,8	15,4	1880
	1400	36,1	8,3	8,9	15,8	12,4	1970

**Tab. 46** Vlastnosti jílu 1574S

1574S	teplota výpalu [°C]	množ. rozděl. vody [%]	ztráta pálením [%]	DS [%]	DP [%]	NV [%]	OH [kg.m <sup>-3</sup> ]
	1000	29,3	5,2	7,1	7,9	16,7	1850
	1100	29,3	5,5	7,1	12,7	8,6	2140
	1200	29,3	5,7	7,1	14,2	0,1	2330
	1300	29,3	5,7	7,1	11,3	3,6	1860
	1400	29,3	5,7	7,1	11,1	5,7	1570

**Tab. 47** Vlastnosti kaolinu Sia

kaolin Sia	teplota výpalu [°C]	množ. rozděl. vody [%]	ztráta pálením [%]	DS [%]	DP [%]	NV [%]	OH [kg.m <sup>-3</sup> ]
	1000	46,7	13,0	7,9	10,6	28,3	1530
	1100	46,7	13,2	7,9	13,5	23,5	1650
	1200	46,7	13,3	7,9	16,3	13,5	1990
	1300	46,7	13,4	7,9	19,9	7,6	2220
	1400	46,7	13,4	7,9	21,1	0,7	2420

### 3.11.2 Neplastické suroviny

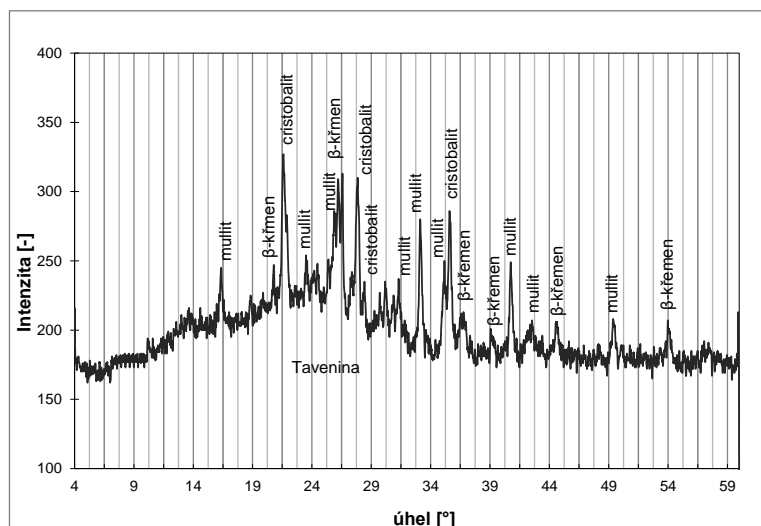
Použitím vyráběných lehčených ostřiv dochází k prodražení receptury. Proto byla snaha použít alternativní ostřiva, především škváru, která má podobné vlastnosti jako keramzit a lze jí tedy za určitých podmínek výhodně nahradit dražší suroviny. Byla použita **škvára** z výrobní divize Březina patřící společnosti P-D Refractories CZ. Je zdravotně nezávadná, což dokazuje protokol o měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech pořízený k 13.1.2012 radionuklidovou laboratoří Vustah v Brně. Index hmotnostní aktivity nepřevyšuje směrnou hodnotu  $I=2$  (byl stanoven na  $I = 0,66 \pm 0,04$ ) a odpovídá tedy požadavkům. Před použitím do keramické směsi byla škvára upravena drcením a mletím na velikost frakce 0 - 3 mm. Poté byly zkoušeny vlastnosti. Škvára se před použitím nevysoušela.

V tabulce 48 je uvedeno kolísání kvality (vlastností a chemického složení) stejné škváry v letech 2008 a 2012. Je patrné, že se zásadním způsobem zvýšil obsah  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a snížil obsah  $\text{SiO}_2$ . Na obrázku 54 je RTG-difrakční analýza škváry, na obrázku 55 potom DTA škváry. Ztráta žíháním až 40 % je velmi vysoká a samotný proces zplyňování tedy není dostatečně účinný. Křivka DSC je z důvodu chybějícího výraznějšího píku značně atypická a interpretace je v tomto případě nejednoznačná. Z RTG - difrakční analýzy lze pozorovat, že škvára pocházející ze zplyňování uhlí obsahuje tři minerály. Jedná se o  $\beta$ -křemen, cristobalit, a mullit. Podstatnou částí je také amorfni složka.

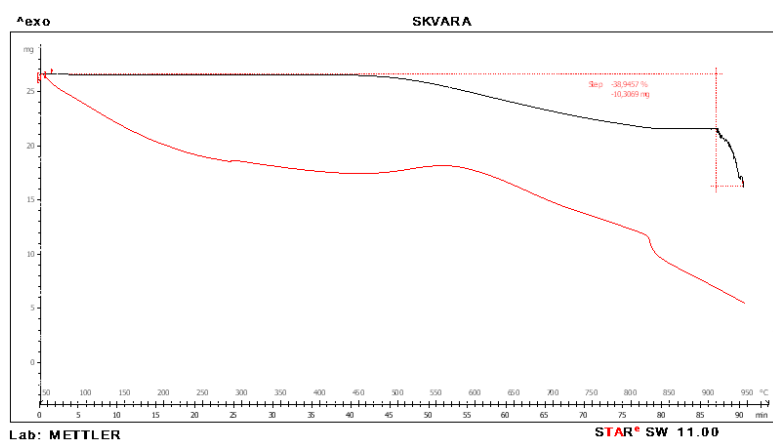
**Tab. 48** Kolísání vlastností škváry

		rok 2008	rok 2012
Chem. složení [%]	$\text{SiO}_2$	65,80	44,02
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	19,97	30,51
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,38	10,83
	$\text{TiO}_2$	1,43	2,00
	CaO	4,85	8,31
	MgO	1,04	2,80
	$\text{Na}_2\text{O}$	0,65	0,52
	$\text{K}_2\text{O}$	0,68	0,86
ztráta žíháním [%]		22,5	40,0
vlhkost [%]		28,3	24,8
obj. hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]		1230	1440
nasákavost [%]		31,5	26,5
zdánl. pórovitost [%]		38,7	38,1





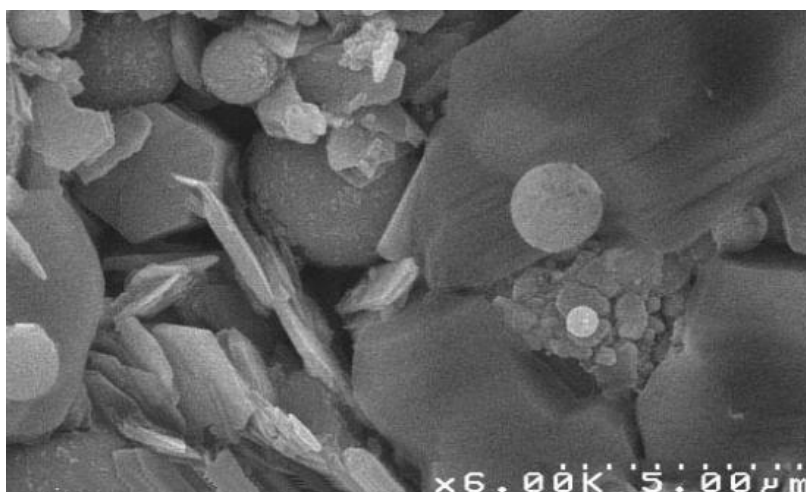
Obr. 54 RTG - difrakční analýza použité škváry



Lab: METTLER

STAR® SW 11.00

Obr. 55 DTA škváry



Obr. 56 Mikroskopické zobrazení škváry

Jako doplněk škváry byla použita ještě jiná lehčená ostřiva. Příkladem jsou například **expandovaný perlit** s označením EP 180, **Alo EX30** a **dinasový zlom** frakce 0 - 0,5 mm.

**Alo EX 30** - Jedná se o kalcinované hliníkové lehčené ostřivo s obsahem  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  minimálně 20 %. Obsah celkového  $\text{Al}_2\text{O}_3$  min. 98,6 %. Velikost částic 45 - 85  $\mu\text{m}$ .

**Expandovaný perlit EP 180** - vyrábí se ze surového perlitu ve speciální expandační peci. Přednostmi tohoto materiálu jsou nízká objemová hmotnost, chemická inertnost, výborné izolační vlastnosti, odolnost vůči škůdcům atd. Obsahuje zrna 0,5 - 2 mm. Neobsahuje jemné částice.  $\lambda$  je cca  $0,048 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ .

**Dinasový zlom** - jedná se o žárovzdorné ostřivo s nízkou objemovou hmotností. Je to pomletý dinas s velikostí zrna 0 - 0,5 mm.

### 3.12 Návrh receptur

Pro zkušební tělesa vyrobená technologií lisováním ze zavhlé směsi pro porovnávání různých keramických vazeb byly navrženy receptury s použitím keramické vazby v množství 25 % a škváry v množství 75 %. Složení je patrné v tabulce 49.

**Tab. 49** Navržené receptury lehčené škvárou

Původní označení vzorku	Nové označení vzorku	Druh keramické vazby	Obsah keramické vazby [%]	Hlavní lehčivo	Obsah hlavního lehčiva [%]	Další lehčiva	Obsah dalších lehčiv [%]
HC/N	D-1	Jíl HC/N	25	Škvára	75	Exp. perlit 180	0
						Alo EX30	
						Dinas. zlom 0-0,5	
HC/R	D-2	Jíl HC/R	25	Škvára	75	Exp. perlit 180	0
						Alo EX30	
						Dinas. zlom 0-0,5	
B1	D-3	Jíl B1	25	Škvára	75	Exp. perlit 180	0
						Alo EX30	
						Dinas. zlom 0-0,5	
BN	D-4	Jíl BNV/B1	25	Škvára	75	Exp. perlit 180	0
						Alo EX30	
						Dinas. zlom 0-0,5	
Wp	D-5	Jíl Wp	25	Škvára	75	Exp. perlit 180	0
						Alo EX30	
						Dinas. zlom 0-0,5	
Sia	D-6	Kaolín Sia	25	Škvára	75	Exp. perlit 180	0
						Alo EX30	
						Dinas. zlom 0-0,5	
15	D-7	Jíl 1574S	25	Škvára	75	Exp. perlit 180	0
						Alo EX30	
						Dinas. zlom 0-0,5	

Dále byly navrženy receptury V1 a V2 s menším množstvím dalšího lehčiva jako je dinasový zlom frakce 0-0,5 mm v množství 8 % doplněný dražšími lehčiv - expandovaný perlit 180 a Alo EX30. Poslední malou skupinou byly tělesa V4 a V5, ve kterých byl zvýšený obsah škváry oproti V1 a V2 (60 %), ale již dinasový zlom neobsahovala. Všechna tato zkušební tělesa (V1-V5) byla pojena keramickou vazbou směsi jílu BNV/B1, která byla poměrem „cena-vlastnosti“ nejpříznivější. Navržené receptury jsou v tabulce 50.

**Tab. 50** Navržené receptury obsahující různá lehčiva

Původní označení vzorku	Nové označení vzorku	Druh keramické vazby	Obsah keramické vazby [%]	Hlavní lehčivo	Obsah hlavního lehčiva [%]	Další lehčiva	Obsah dalších lehčiv [%]
V1	D-8	Jíl BNV/B1	30	Škvára	50	Exp. perlit 180	5
						Alo EX30	7
						Dinas. zlom 0-0,5	8
V2	D-9	Jíl BNV/B1	30	Škvára	50	Exp. perlit 180	5
						Alo EX30	7
						Dinas. zlom 0-0,5	8
V4	D-10	Jíl BNV/B1	30	Škvára	60	Exp. perlit 180	5
						Alo EX30	5
						Dinas. zlom 0-0,5	0
V5	D-11	Jíl BNV/B1	30	Škvára	60	Exp. perlit 180	5
						Alo EX30	5
						Dinas. zlom 0-0,5	0

### 3.13 Příprava zkušebních těles

Nadávkováním a zhomogenizováním jednotlivých surovin byly vytvořeny pracovní hmoty a to tím způsobem, že ke škváře byla přidána voda v množství 6 % z hmotnosti ostatních surovin. Poté byla škvára míchána s keramickou surovinou. Tělesa byla následně lisována lisovacím tlakem uvedeným v tabulce 51. Celkem bylo vytvořeno 33 zkušebních těles a uvedené hodnoty jsou průměrem ze tří měření.

**Tab. 51** Lisovací tlaky pro jednotlivá tělesa

Druh jílu	HC/N	HC/R	B1	BN	WP	Sia	15
Lisovací tlak [MPa]	5	4	4	5	5	5	4

Po vytvoření těles technologií lisováním ze zavhlé směsi byla tělesa vysušena a vypálena na teplotu 1070 °C. Tělesa jsou zobrazena na obr. 57.



Obr. 57 Zkušební tělesa

### 3.14 Metodika testování zkušebních těles

Na zkušebních tělesech bylo provedeno stanovení smrštění sušením a pálením, které se zjistilo ze vzorců uvedených v kapitolách 3.7.1 a 3.8.1 (pouze smrštění pálením probíhalo pro všechny vzorky při stejné teplotě 1070 °C). Dále součinitel tepelné vodivosti uvedený v kapitole 3.8.3, objemová hmotnost jejíž určení je v kapitole 3.8.4. Dalšími zkouškami bylo stanovení pevnosti v tlaku a ztráta žíháním.

#### 3.14.1 Stanovení ztráty žíháním

Stanovení ztráty žíháním má určit v materiálu obsah látek, které lze odstranit pálením, a které jsou pro finální parametry výrobku nepotřebné nebo škodlivé. Při stanovení ztráty žíháním se do vyžíhaného a zváženého platinového nebo keramického kelímku naváží vysušený vzorek a žihá se při teplotě 1100 °C v elektrické peci. Testovaný materiál se dává do studené pece, aby nevznikala ztráta úletem při prudkém zahřátí a unikání CO<sub>2</sub>. Žihá se do ustálené hmotnosti a z rozdílů hmotnosti před a po žíhání se vypočítá ztráta žíháním, která se vyjádří v procentech.

Ztráta žíháním se zjistí ze vzorce:

$$z\dot{z} = \frac{m_s - m_z}{m_s} \cdot 100 \quad [\%]$$

$m_s$       hmotnost navážky vysušeného vzorku      [g]

$m_z$       hmotnost vzorku po vyžíhání      [g]

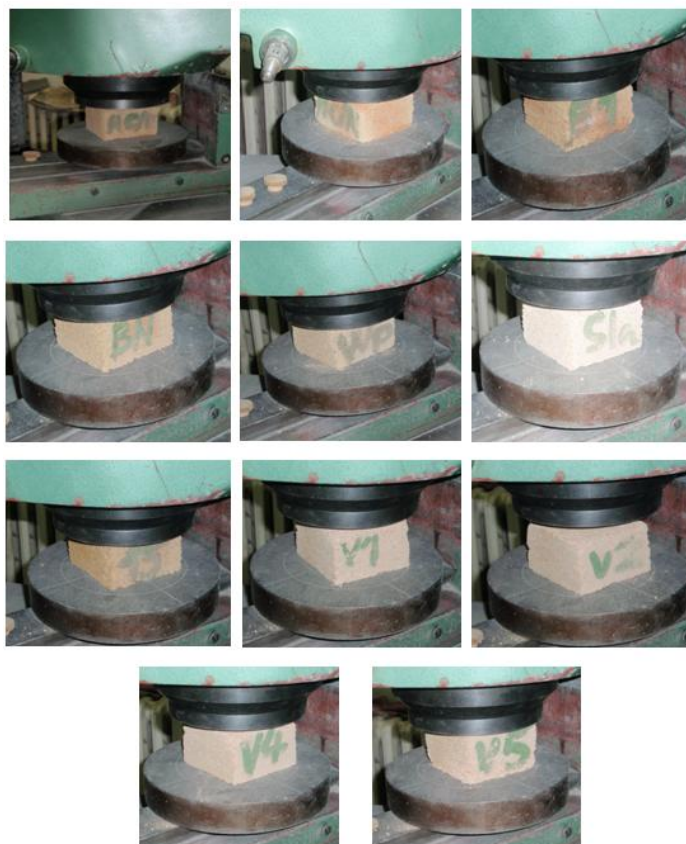
### 3.14.2 Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku lze charakterizovat jako schopnost výrobku vzdorovat účinkům síly, která na něj působí. Tento parametr je u izolačních materiálů důležitý, aby bylo patrné, jestli je vůbec zajištěna manipulovatelnost. U materiálů s objemovou hmotností větší než  $500 \text{ kg.m}^{-3}$  by tato hodnota měla být vyšší než 1 MPa [20]. Tato zkouška byla prováděna v akreditované laboratoři VUT FAST. Na obrázku 58 lze pozorovat zjišťování pevnosti v tlaku na tělesech označených (po řádcích) HC/R, HC/N, B1, BN, Wp, Sia, 15, V1, V2, V4 a V5).

Pevnost v tlaku se stanoví pomocí vzorce:

$$R_c = \frac{F}{A} \quad [\text{MPa}]$$

F	síla působící na těleso	[N]
A	tlačená plocha tělesa	[mm <sup>2</sup> ]



**Obr. 58** Zjišťování pevnosti v tlaku v laboratoři VUT FAST

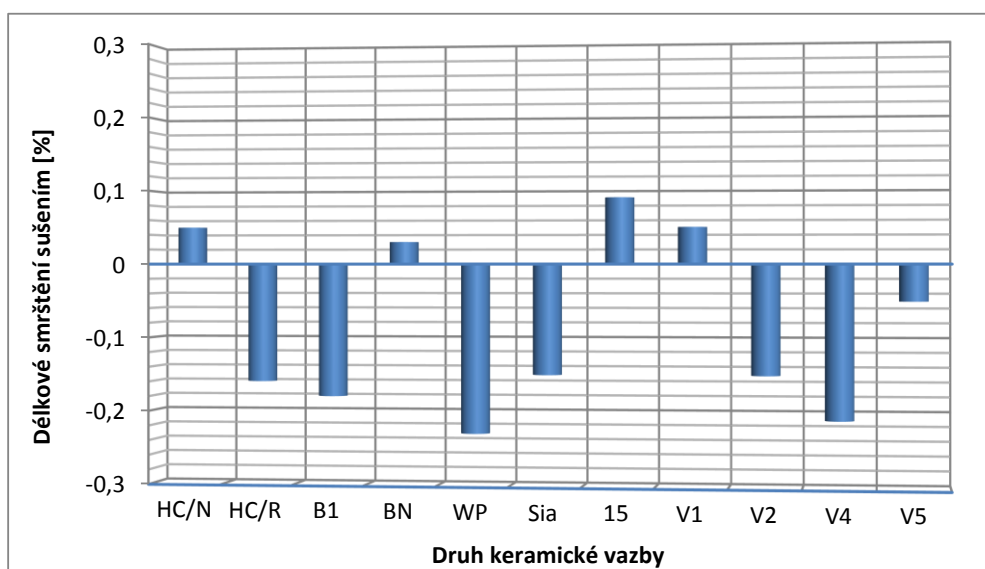
## 3.15 Výsledky experimentů

### 3.15.1 Smrštění sušením

Byly stanoveny délkové změny sušením u těles s různou keramickou vazbou. Výsledné délkové změny při obsahu 6 % vody (hmotnostně) jsou uvedeno v tabulce 52 a na obrázku 59. Záporné hodnoty značí smrštění, kladné nárůst délky zkušebního tělesa po vysušení.

**Tab. 52** Délkové změny sušením

Druh vazby	HC/N	HC/R	B1	BN	WP	Sia	15	V1	V2	V4	V5
DS [%]	0,05	-0,16	-0,18	0,03	-0,23	-0,15	0,09	0,05	-0,15	-0,21	-0,05



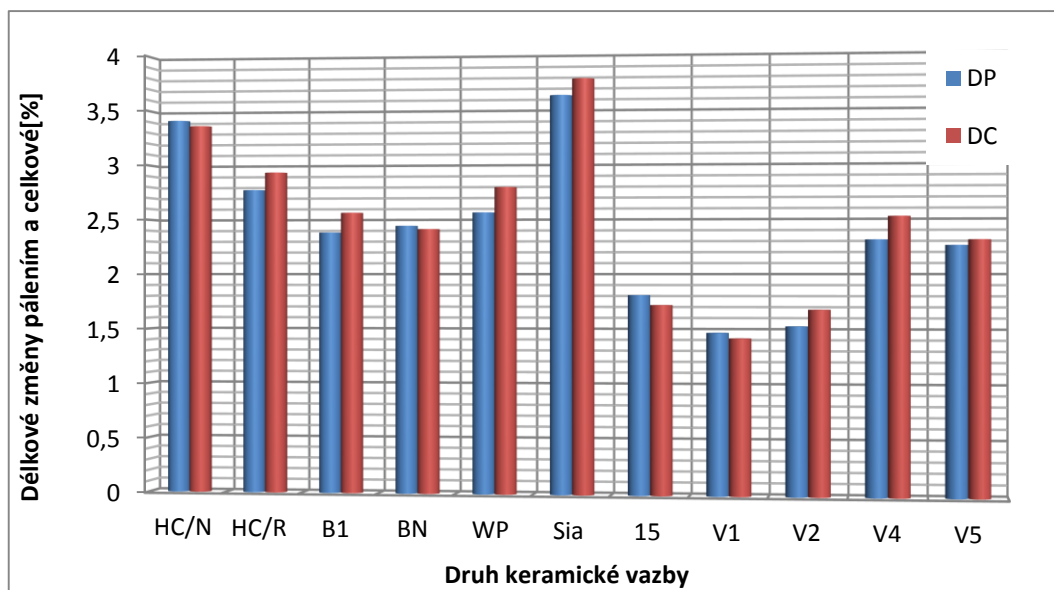
**Obr. 59** Délkové změny sušením

### 3.15.2 Smrštění pálením, smrštění celkové

Délkové změny pálením a celkové jsou v tabulce 53. Znaménkem mínus je označeno smrštění. Všechny vzorky se smršťovaly. Na obr. 60 je smrštění pálením a celkové znázorněno graficky (graf je vyneseno v absolutní hodnotě).

**Tab. 53** Délkové změny pálením a celkové

Druh vazby	HC/N	HC/R	B1	BN	WP	Sia	15	V1	V2	V4	V5
DP [%]	-3,41	-2,77	-2,38	-2,44	-2,56	-3,62	-1,81	-1,47	-1,53	-2,31	-2,26
DC [%]	-3,36	-2,93	-2,56	-2,41	-2,79	-3,77	-1,72	-1,42	-1,68	-2,52	-2,31



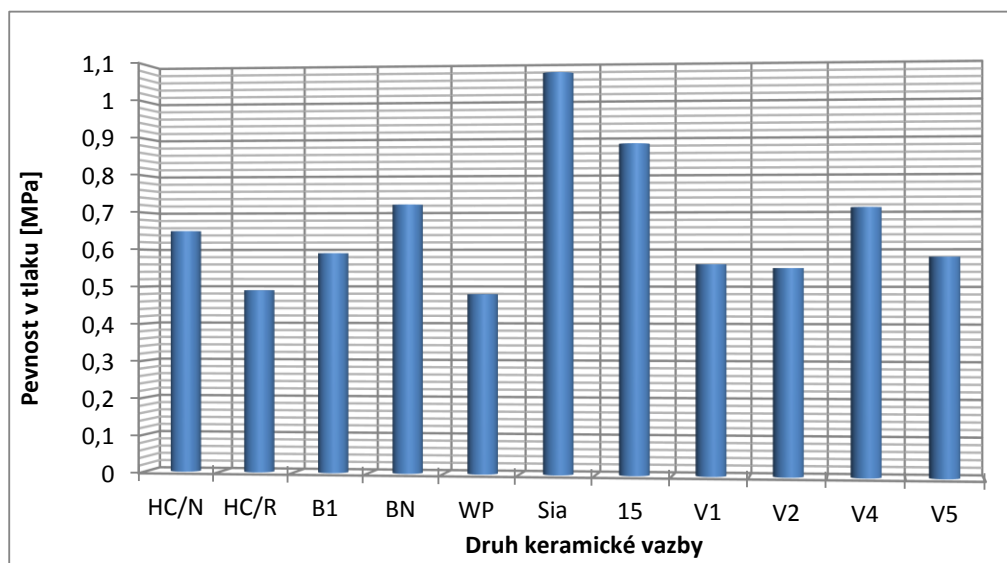
Obr. 60 Smrštění pálením a celkové

### 3.15.3 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku pro jednotlivá zkušební tělesa je zanesena v tabulce 54. Grafické znázornění pevnosti je na obrázku 61.

Tab. 54 Pevnost v tlaku

Druh vazby	HC/N	HC/R	B1	BN	WP	Sia	15	V1	V2	V4	V5
Rc [MPa]	0,65	0,49	0,59	0,72	0,48	1,07	0,88	0,56	0,55	0,71	0,58



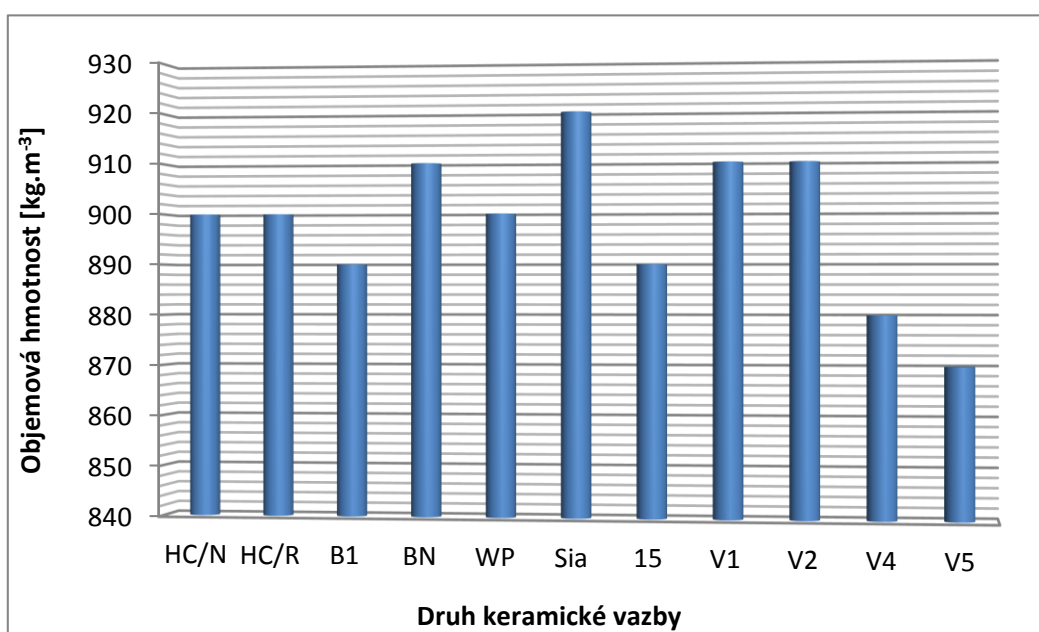
Obr. 61 Pevnost v tlaku

### 3.15.4 Stanovení objemové hmotnosti

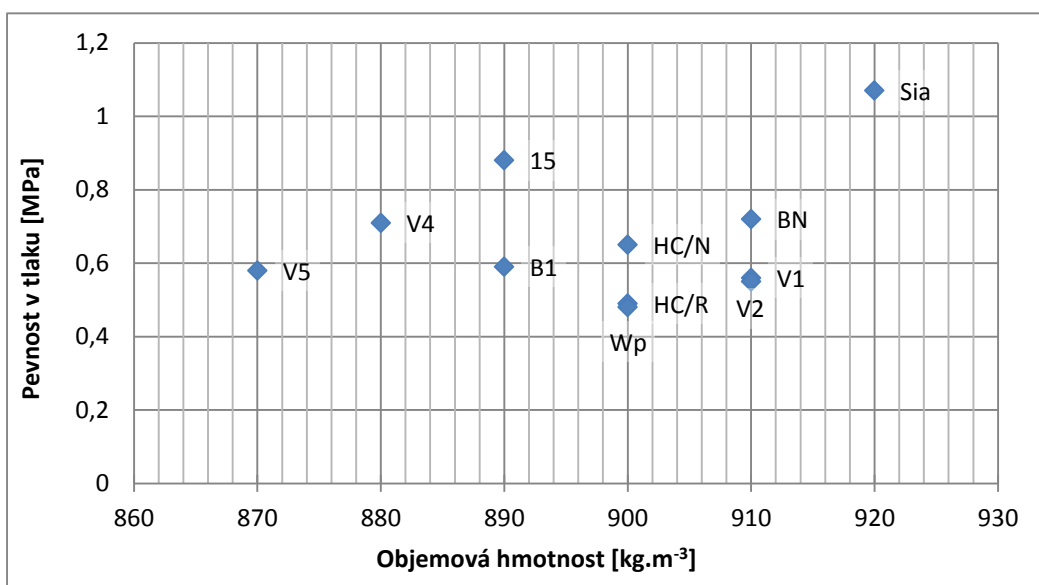
Výsledky objemových hmotností jednotlivých zkušebních těles jsou uvedeny v tabulce 55 a na obrázku 62. Na obrázku 63 je potom patrná (ne)závislost pevnosti v tlaku na objemové hmotnosti těchto těles.

**Tab. 55** Objemová hmotnost

Druh vazby	HC/N	HC/R	B1	BN	WP	Sia	15	V1	V2	V4	V5
OH [kg.m <sup>-3</sup> ]	900	900	890	910	900	920	890	910	910	880	870



**Obr. 62** Stanovení objemové hmotnosti



**Obr. 63** Závislost pevnosti v tlaku na objemové hmotnosti

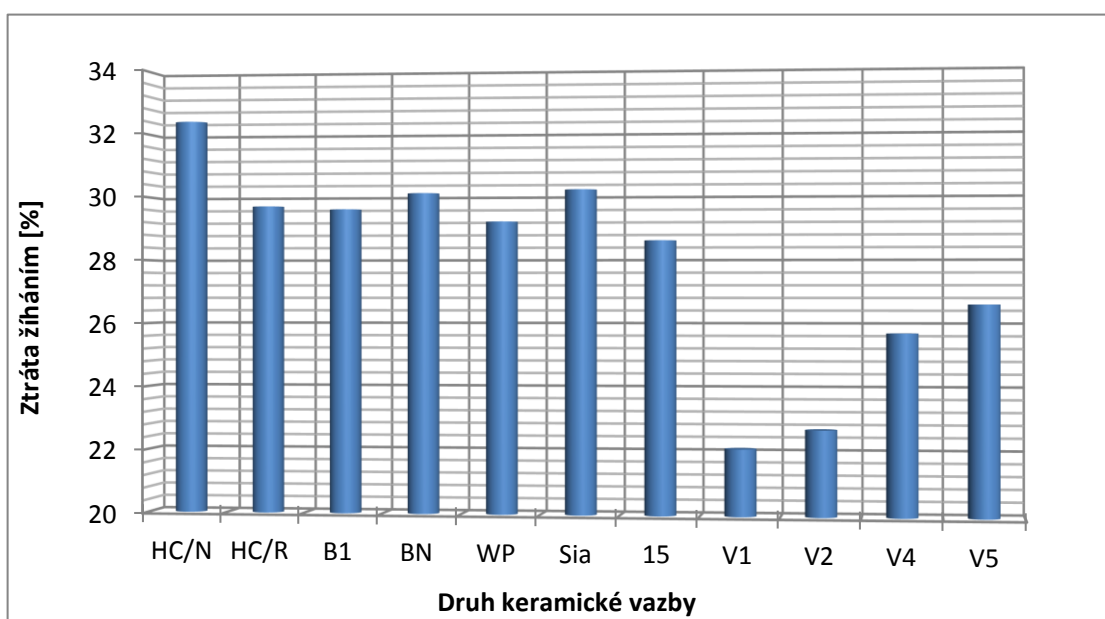


### 3.15.5 Ztráta žiháním

Ztráta žiháním je stanovena pro celkovou hmotu výrobku a uvedena je v tabulce 56. Grafické znázornění je pak na obr. 64.

**Tab. 56** Ztráta žiháním hmoty

Druh vazby	HC/N	HC/R	B1	BN	WP	Sia	15	V1	V2	V4	V5
ZŽ hmoty [%]	32,4	29,7	29,6	30,1	29,2	30,2	28,6	22,1	22,7	25,7	26,6

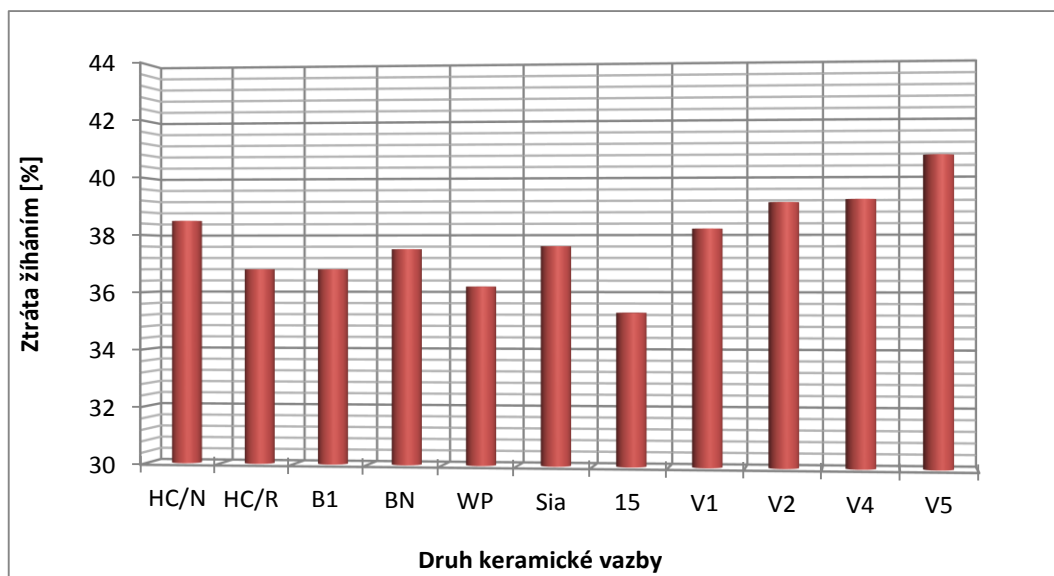


**Obr. 64** Ztráta žiháním hmoty

Bylo provedeno také stanovení ztráty žiháním škváry a výsledky jsou uvedeny v tabulce 57 a na obrázku 65.

**Tab. 57** Ztráta žiháním škváry

Druh vazby	HC/N	HC/R	B1	BN	WP	Sia	15	V1	V2	V4	V5
ZŽ škváry [%]	38,5	36,8	36,8	37,5	36,2	37,6	35,3	38,2	39,1	39,2	40,7



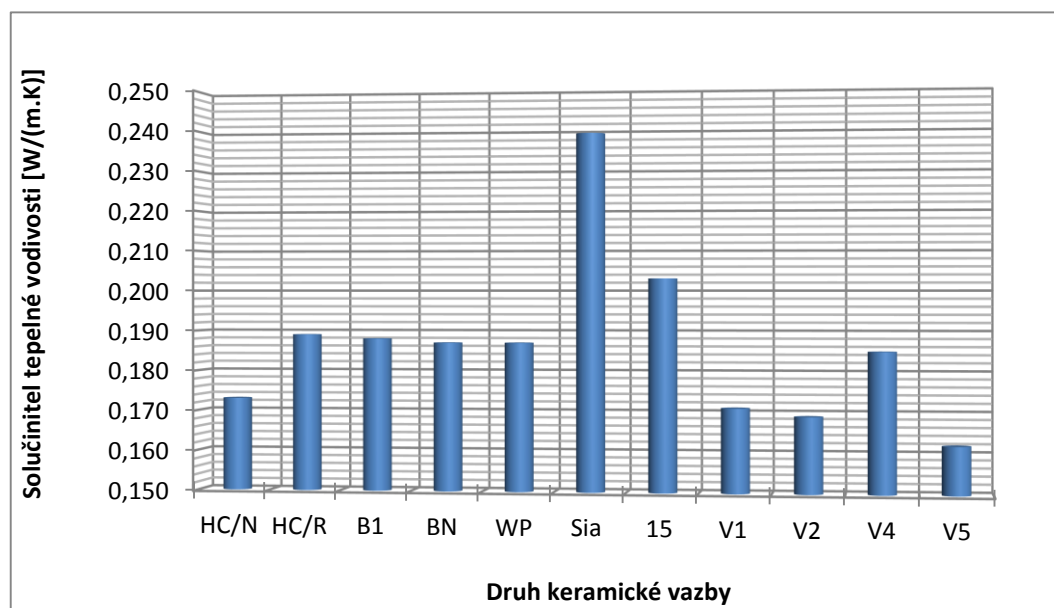
Obr. 65 Ztráta žháním škváry

### 3.15.6 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti byl stanoven na všech vzorcích a výsledné hodnoty jsou v tabulce 58 a na obrázku 66.

Tab. 58 Součinitel tepelné vodivosti

Druh vazby	HC/N	HC/R	B1	BN	WP	Sia	15	V1	V2	V4	V5
$\lambda$ [W/(m.K)]	0,173	0,189	0,188	0,187	0,187	0,239	0,203	0,171	0,169	0,185	0,162

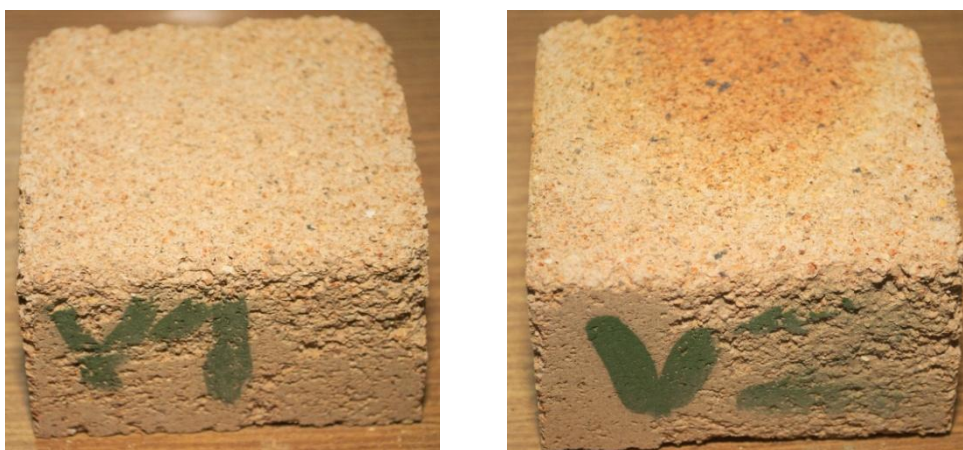


Obr. 66 Součinitel tepelné vodivosti

### 3.16 Diskuse výsledků části B1

Z výše uvedených výsledků je patrné, že smrštění sušením bylo nejvyšší u receptury Wp (smrštění o 0,23 %). Nejvyšší nárůst délky po vysušení vykazala naopak tělesa označená jako 15 (0,09 %). Celkově lze říci, že lineární délkové změny sušením byly, díky technologii výroby lisováním ze zavlhle směsi, velmi malé a u žádné receptury nepřesáhlo smrštění či nárůst objemu 0,3 %.

Smrštění pálením při teplotě 1070 °C bylo zjištěno nejvyšší u receptury Sia (až 3,62 %). Souvisí to se ztrátou žíháním, která byla u této (i následujících) receptur rovněž nejvyšší (30,2 % pro hmotu). Receptury Sia a HC/N obsahují velké množství spalitelných prvků. Nejnižší smrštění pálením bylo zjištěno u receptur s obsahem dinasového zlomu V1 (1,47 %) a V2 (1,53 %). Dinasový zlom tedy snižuje smrštění pálením, avšak také narušuje celistvost, protože se s keramickou vazbou dostatečně nespojí (viz obrázek 67) a doporučuje se tedy dinasový zlom pro tyto účely nepoužít.



**Obr. 67** Patrné narušení struktury těles s obsahem dinasového zlomu

Dále zvýšením obsahu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v podobě lehčiva Alo EX 30 je materiál neschopný při vypalovací teplotě dostatečně slinout, což také narušuje strukturu a nedoporučuje se. Nekvalitní povrch byl však patrný u všech vzorků a všechny vykazovaly značnou drolivost kvůli modifikačním přeměnám  $\beta$ -křemene.

Pevnosti v tlaku všech receptur s různou keramickou vazbou byly velice nízké. Nejvyšší pevnosti dosáhla receptura označená jako Sia (1,07 MPa), ale i u tohoto výrobku pevnost v tlaku nebyla dobrá. Receptura s označením 15 (0,88 MPa) byla druhá nejpevnější. Ani pevnosti dalších zkušebních těles nepřesáhly

hodnotu 1 MPa a lze tedy pozorovat, že pevnost všech těles je nedostačující. Je to způsobeno nízkým výrobním lisovacím tlakem a narušenou strukturou výrobků.

Objemová hmotnost byla u všech receptur velice podobná a pohybovala se mezi 870 a 920 kg.m<sup>-3</sup>. Nejnižší hmotnost měly receptury V4 a V5 obsahující 60 % škváry a s obsahem drahých lehčiv jako je expandovaný perlit EP180 a Alo EX 30, což je dáno nízkou objemovou hmotností těchto přímých lehčiv.

Součinitel tepelné vodivosti byl v závislosti na objemové hmotnosti nejlepší u receptur s obsahem dražších lehčiv a to u receptur V5 [0,165 W.(m.K)<sup>-1</sup>], V2 [0,169 W.(m.K)<sup>-1</sup>] a V1 [0,171 W.(m.K)<sup>-1</sup>].

## **ČÁST B2 - Využití škváry pro výrobu izolačních materiálů s OH do 1100 Kg.m<sup>-3</sup>**

Tato část experimentu testuje provozní tělesa ze společnosti PD-Refractories a možnosti využití škváry namísto dražších uměle vyráběných lehčiv.

### **3.17 Použité suroviny**

Uhlí určené pro zplyňování obsahuje obvykle 30-35 % těkavých látek a 40-45 % vázaného uhlíku. Při zplyňovacím procesu pyrolýzou uhlíku vzniknou spaliny a ty reagují s výpary za odcházení CO a H<sub>2</sub>. Těmto sloučeninám říkáme plynné produkty. Jsou primárně využívány jako palivo při vypalování žáromateriálů a to v rozličných druzích pecí. Rychlé hašení rozpáleného uhlí po reakci naruší a zdrobní původní strukturu zrn. A anorganický zbytek po této kompletní přeměně uhlíku na plynné produkty se nazývá škvára.

Při zplyňování uhlí vzniká škvára obrovské množství (cca 4700 milionů tun za rok), která se používá pouze k násypům, posypům a skládkování. Zbavit se takového množství škváry představuje obrovské náklady. Proto je nezbytné jí využít i jinak např. jako druhotnou surovinu. Svými vlastnostmi jako je vysoká pórovitost (45-50 %) a charakteristickým protáhlým tvarem zrn se jeví jako výhodná náhrada za uměle vyráběná lehčiva. [21]

V tomto případě je snaha nahradit škvárou keramzit. **Škvára** využitá v tomto experimentu pochází ze zplyňování uhlí Ořech II z Mostu. Její vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 3.11.2 na straně 79.

V tabulce 59 jsou uvedena chemická složení a vlastnosti dalších lehčených ostřív použitých při výrobě provozních těles. Jedná se o **mikrosféry**, **keramzit** frakce 0-4 mm a expandovaný **perlit**.

**Tab. 59** Sekundární lehčená ostřiva

Název suroviny		<b>Mikrosféry</b>	<b>Keramzit</b>	<b>Expandovaný perlit</b>
Označení		<b>JET-S-K500</b>	<b>Liapor 0-4</b>	<b>EP 180</b>
Druh suroviny		lehčené ostřivo		
Ztráta žháním [%]		0,3 - 0,5	0,3 - 0,4	0,2 - 0,3
Vlhkost [%]		0,4 - 0,5	0,04 - 0,05	0,0 - 0,2
Chem. složení [%]	SiO <sub>2</sub>	66,2 - 66,5	49,4 - 50,1	72,9 - 75,1
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,4 - 21,3	26,3 - 28,7	12,9 - 17,3
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,1 - 3,4	9,6 - 11,6	1,4 - 2,5
	TiO <sub>2</sub>	0,7 - 0,9	3,0 - 4,2	0,0 - 0,6
	CaO	1,6 - 2,1	4,4 - 4,5	1,0 - 2,0
	MgO	1,6 - 1,9	3,3 - 3,4	0,0 - 0,7
	Na <sub>2</sub> O	1,1 - 1,5	0,1 - 0,2	0,3 - 1,3
	K <sub>2</sub> O	3,4 - 3,5	2,3 - 2,5	4,6 - 5,4



**Obr. 68** Zleva obrázky mikrosfér, keramzitu a perlitu

Jako pojivo byly použity jíly **B1** a **BNV/B1**. Jejich vlastnosti jsou uvedeny v tabulkách 42 a 44 v předcházející kapitole.

### 3.18 Návrh receptur

Jako lehčené ostřivo do zkušebních těles bylo zkoušeno různé množství škváry, a to konkrétně 70 %, 60 % a 10 % z celkového množství hmoty. Některé receptury byly doplněny dále mikrosférami a referenční také expandovaným perlitem. Jako referenční sloužila receptura SL11-1 (tělesa označena 1 a 2). Její surovinové náklady byly do 5000,- Kč/t. Navržené receptury jsou uvedeny v tabulce 60.

**Tab. 60** Navržené receptury

Číslo	Označení	Druh keram. vazby	Obsah ker.vazby [%]	Hlavní lehčivo	Obsah lečiva [%]	Jiné lehčivo I	Obsah lečiva I [%]	Jiné lehčivo II	Obsah lečiva II [%]
1	SL 11-1	B1	25	keramzit	60	mikrosféry	5	EP 180	10
2	SL 11-1			keramzit	60	mikrosféry	5	EP 180	10
3	SL 11-2	BNV/B1	30	škvára	70				
4	SL 11-2			škvára	70				
5	SL 11-3	BNV/B1	40	škvára	60				
6	SL 11-3			škvára	60				
7	SL 11-3			škvára	60				
8	SL 11-3			škvára	60				
9	SL 11-3			škvára	60				
10	SL 11-4	B1	25	keramzit	60	mikrosféry	5	škvára	10
11	SL 11-4			keramzit	60	mikrosféry	5	škvára	10
12	SL 11-5	BNV/B1	40	keramzit	45	mikrosféry	5	škvára	10
13	SL 11-5			keramzit	45	mikrosféry	5	škvára	10

Další referenční skupinou je receptura SL11-4 (tělesa 10 a 11) která je upravenou recepturou SL11-1 a tělesa mají větší formát. Ta obsahuje, jako náhradu za expandovaný perlit, škváru. Tělesa 12 a 13 jsou obdobou, ale mají odlišnou keramickou vazbu než SL11-4. Jíl B1 je nahrazen jílem BNV/B1, což je levnější varianta (vyrobená smíšením jílu B1 s jílem BNV).

### 3.19 Příprava těles

Technologií lisováním ze zavlhle směsi byla tělesa vytvořena. Zkušební tělesa jsou na obrázku 69.



**Obr. 69** Zkušební tělesa vyrobená technologií lisováním ze zavhlé směsi

Žárovzdorné výrobky, jejich rozměry a tvar specifikuje ČSN ISO 5019 část 1 až 6. Pravoúhlé tvarovky (ČSN ISO 5019 - 1) se vyrábějí ve dvou řadách - 64 mm



a 76 mm. Pro tuto práci byl zvolen rozměr 64 mm. Rozměry zkušebních těles 1-9 byly 220 x 110 x 64 mm. Tělesa 10-13 byla vytvořena ve formátu 250 x 125 x 64 mm. Bylo tomu tak kvůli snaze zjistit, zda škvára dokonale vyhoří při větším formátu tělesa. Tělesa byla vytvářena lisovacím tlakem o hodnotě 20 MPa. Tato hodnota byla zjištěna provozními zkouškami, při kterých se zjistilo, že při nižším vytvářecím napětí se výsledná pevnost zkušebních těles zásadně snižuje. Bylo vyrobeno 39 kusů.

Tělesa označená SL11-1 až SL 11-3 byla vypálena na 1040 °C, tělesa zbylá pak na 1070 °C.

### 3.20 Metodika testování zkušebních těles

Zkušební tělesa byla testována na vlastnosti, které byly uvedeny výše tj. objemová hmotnost, pevnost v tlaku a součinitel tepelné vodivosti. V této části byla věnována pozornost také úrovni vyhoření škváry a tvorbě černých jader.

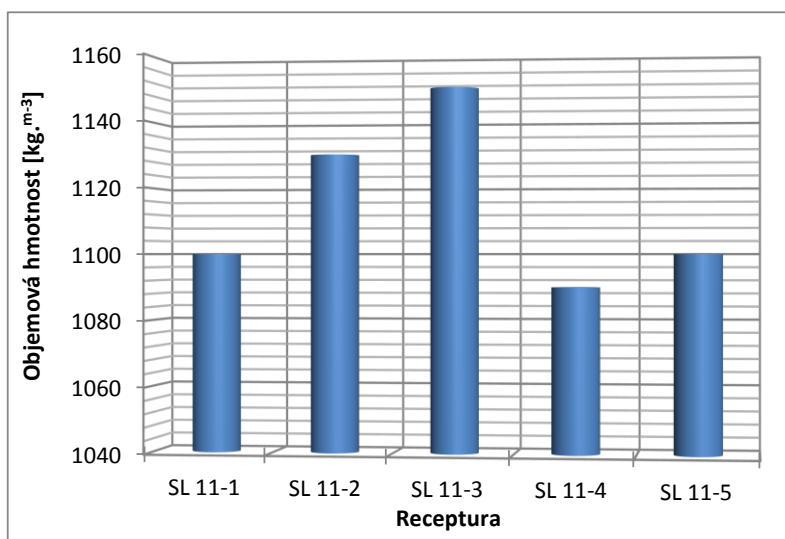
### 3.21 Výsledky testování zkušebních těles

#### 3.21.1 Objemová hmotnost

Tělesa byla změřena, zvážena a byla u nich zjištěna objemová hmotnost. Ta je uvedena v tabulce 61. Hodnoty jsou průměrem ze tří měření. Objemová hmotnost je graficky také na obrázku 70.

**Tab. 61** Průměrná objemová hmotnost těles

Označení	SL 11-1	SL 11-2	SL 11-3	SL 11-4	SL 11-5
OH [kg.m <sup>-3</sup> ]	1100	1130	1150	1090	1100



**Obr. 70** Průměrná objemová hmotnost zkušebních těles

Lze pozorovat, že receptury SL 11-3 a SL 11-2 nesplňují požadavek na objemovou hmotnost do  $1100 \text{ kg.m}^{-3}$ .

### 3.21.2 Chemické složení

Na tělesech bylo zjištěno chemické složení, které je uvedeno v tabulce 62.

**Tab. 62** Chemické složení

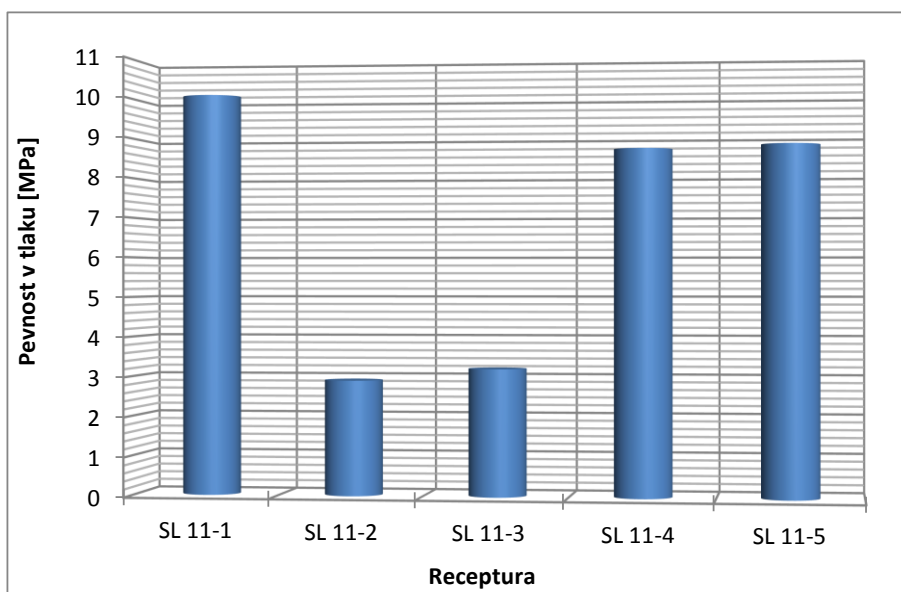
Chemické složení [%]	Obsaž. oxidy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	SiO <sub>2</sub>	51,0		46,3				47,8			50,7		50,7	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,8		37,7				36,8			29,2		31,5	
	TiO <sub>2</sub>	2,8		1,9				1,7			2,9		2,9	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,2		6,9				6,6			7,8		7,1	
	CaO	3,5		4,0				3,8			3,8		3,3	
	MgO	1,8		1,9				1,8			1,9		1,6	
	K <sub>2</sub> O	2,2		1,0				1,0			2,6		2,2	
	Na <sub>2</sub> O	0,6		0,3				0,3			0,9		0,7	

### 3.21.3 Pevnost v tlaku

Na provozních zkušebních tělesech byla vyzkoušena pevnost v tlaku. Hodnoty pevnosti v tlaku pro jednotlivé receptury jsou v tabulce 63 a na obrázku 71.

**Tab. 63** Pevnost v tlaku těles z jednotlivých receptur

Označení	SL 11-1	SL 11-2	SL 11-3	SL 11-4	SL 11-5
R <sub>c</sub> [MPa]	10,1	2,9	3,2	8,7	8,8



**Obr. 71** Průměrná pevnost v tlaku pro tělesa z jednotlivých receptur



### 3.21.4 Součinitel tepelné vodivosti

Na zkušebních tělesech daných receptur byl stanoven součinitel tepelné vodivosti. Jeho hodnoty jsou uvedeny v tabulce 64.

**Tab. 64** Součinitel tepelné vodivosti

Označení	SL 11-1	SL 11-2	SL 11-3	SL 11-4	SL 11-5
$\lambda$ [W.(m.K) <sup>-1</sup> ]	0,291	0,332	0,334	0,355	0,375

### 3.21.5 Vizuální posouzení (černé jádro)

Při pálení za nedostatku kyslíku (v tzv. redukčním prostředí) vzniká nebezpečí vyhořívání organických látek v keramickém materiálu obrácenou Boudardovou reakcí. V tomto případě oxid uhelnatý, který vzniká, difunduje z povrchu vypalovaného materiálu hlouběji do jeho středu, kde je nižší teplota. Zde nastává jeho rozklad a uhlík se usazuje. Oxid uhličitý CO<sub>2</sub> naopak difunduje ze středu na povrch, z míst nižších teplot do vyšších a při tom reaguje s uhlíkem za vzniku CO. Část unikne jako CO<sub>2</sub>.

Důsledkem tohoto jevu je zpomalování vyhořívání, protože uhlík se přesunuje dovnitř střepu, kde se zvyšuje jeho obsah a střed střepu černá. Tímto procesem se vytváří tzv. černé jádro. Uhlík vznikající ve střepu se po delším působení vyšší teploty stává méně aktivním tzv. grafitizuje. Tento koncentrovaný uhlík se velmi obtížně spaluje a přetrvává i při vysokých teplotách výpalu.

Chemická rovnice tvorby černého jádra:



Rychlost vyhořívání vzrůstá s teplotou, ale to se děje pouze do určité hranice, od níž se opět zpomaluje, neboť se zvyšuje slinutost střepu. Lehce těkavé látky by měly uniknout ze střepu do teploty 350 °C. Zvýší-li se podíl paliva ve střepu, prodlužuje se doba jeho vyhoření, ale zvyšuje se pórovitost střepu a tím klesá difuzní odpor. Vyhořívání organických látek v keramickém střepu s vysokým obsahem oxidu železitého Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (zdroj je např. siderit, pyrit, hematit, limonit aj.) může vést také ke vzniku tzv. redukčního jádra [22].

V tomto případě se černé jádro, při rozdrčení zkušebních těles u zkoušky pevnosti v tlaku, objevilo u těles označených SL 11-2 a SL 11-3 viz obrázek 72 a obrázek 73. Jsou to receptury, ve kterých je navržen vysoký obsah škváry (70 % a 60 %) a takto velké množství tedy nevyhoří.



**Obr. 72** Černé jádro u těles SL 11-2



**Obr. 73** Černé jádro u těles SL 11-3



**Obr. 74** Detail odebraného jádra

### 3.22 Diskuse výsledků části B2

Používáním lehčených uměle vyráběných ostřiv jako je například keramzit nebo perlit dochází k prodražení výroby a výrobku. Snahou o zmírnění těchto zvýšených nákladů bylo použití škváry jako alternativního lehčiva. Škvára však v množství 70 % ani 60 % nevyhoří. DTA v kapitole 3.11.2 dokazuje, že problém s vyhořením škváry nastává cca nad 550 °C.

Určité zlevnění surovinových nákladů přichází s použitím škváry v množství 10 % (receptury SL 11-4 a SL 11-5). Toto množství bez problémů vyhoří a u těchto výrobků tedy nevznikla černá jádra. To i přesto, že tělesa z těchto receptur byla vyrobena většího formátu, aby se zjistilo, jestli se černé jádro neobjeví ani při zvětšené velikosti těles.

Objemová hmotnost se ukázala jako nejnižší u receptur SL 11-4 (1090 kg.m<sup>-3</sup>). Je to způsobenou použitím mikrosfér a keramzitu. Tyto materiály mají samy nižší objemovou hmotnost než škvára použitá u těles jiných.

Pevnost v tlaku byla po testování zkušebních těles určena jako nejvyšší u receptury SL 11-1 (hodnota byla v průměru 10,1 MPa). Je zřejmé, že pevnost v tlaku zvyšuje opět především keramzit, který je v recepturách s nejvyššími pevnostmi obsažen ve velkém množství (60 % resp. 45 % - viz tabulky 60 a 63). Pro pevnost zkušebních je také nepříznivou okolností černé jádro, které pevnosti snižuje. Součinitel tepelné vodivosti byl nejlepší (nejnižší) u referenční receptury SL 11-1. S ubývajícím množstvím keramzitu se  $\lambda$  výrazně zvyšovala.

## 4. ZÁVĚR

Práce byla zaměřena na zlevnění surovinových nákladů a možnost využít levnější materiály při relativně dobrých vlastnostech výrobků.

Experimentální část práce, zaměřená na výrobu žárovzdorných izolačních materiálů technologií lisováním z plastického těsta, dokázala, že kombinací jílu pórovinových a jílu B1 lze s úspěchem zlepšit vlastnosti izolačních žáromateriálů. Přídavkem jílu B1 se dosáhlo zvýšení pevnostních charakteristik a lze pro dosažení stejných pevností použít nižší teplotu výpalu. To umožní ještě snížit náklady na výrobu těles technologií z plastického těsta. Optimalizačním výpočtem byla vybrána jako nejlepší receptura 90N\_850 (přidání 10 % jílu B1 k 90 % jílu HC/N a výpal na teplotu 850 °C). Zlepšení tepelně izolačních vlastností lze dosáhnout vylehčením pilinami. Nevýhodou tohoto druhu výroby je nízká rozměrová přesnost výrobků.

Naopak vysokou rozměrovou přesnost mají materiály, které jsou vyráběné technologií lisováním ze zavhlé směsi. Jejich nevýhodou je vyšší cena, proto byla snaha je zlevnit přídavkem škváry a vhodnou keramickou vazbou. Ukázalo se, že je vhodné pro zvýšení pevnostních charakteristik použít vazné slínavé jíly. Je také nutno při použití samotné škváry s jílem lisovat tlakem minimálně 20 MPa, pro získání pevnější struktury. Výrobky obsahující vysoké množství škváry (75 %) dostatečně neslinuly. Množství škváry bylo proto při testech sníženo na 60 % a 50 % a doplněno dalšími lehčivý jako je dinasový zlom, hliníkové lehčené ostřívo a perlit. Dinasový zlom ovšem narušuje strukturu a není tedy pro tento druh výroby vhodný. Hliníkové lehčené ostřívo se také nedoporučuje použít, protože výrobek hůře slinoval.

Poslední část práce byla zaměřena na možnosti využití škváry do izolačních žáromateriálů. Zjištěným výsledkem této práce je, že škvárou z oblasti Březina keramzit nahradit lze. Problémem této části experimentu bylo především černé jádro, které se utvářelo v materiálech s obsahem škváry 70 a 60 %. Doporučené množství škváry, které lze při výrobě použít, je 10 % z celkové hmotnosti surovin. Tento obsah nepůsobil v materiálu žádné problémy. Také je nutné zabývat se samotným procesem zplyňování uhlí, ztráta žíháním totiž

dosahuje u škváry hodnot až 40 %. Účinnost zplyňování je tudíž velice nízká, protože v některých provozech se při zplyňování dosahuje i nulových hodnot [21].

Porovnáváme-li mezi sebou žáromateriály vyrobené technologií z plastického těsta a lisováním ze zavlhlé směsi, v tepelně izolačních vlastnostech je jednoznačně lepší technologie z plastického těsta [až  $0,11 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  pro N-P\_950]. Technologií výroby z plastického těsta lze, za pomoci kombinace jílu, získat i dobré manipulační pevnosti při nízké teplotě výpalu. Proto se doporučuje pro zlevnění výroby používat technologii výroby z plastického těsta.

## Seznam použitých zdrojů:

- [1] JIRÁSEK, Jakub a Martin VAVRO. *Nerostné suroviny a jejich využití*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-1378-3.
- [2] LACH, Vladimír. *Teoretické základy výroby pálených stavebních látek: keramika II*. Vyd. 1. Brno: VUT, 1989, 131 s.
- [3] FIALA, Jaroslav, Václav MENTL a Pavel SUTTA. *Struktura a vlastnosti materiálů*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2003, 572 p. ISBN 80-200-1223-0.
- [4] PYTLÍK, Petr; SOKOLÁŘ, Radomír. *Stavební keramika: Technologie, vlastnosti a využití*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002. 287 s. ISBN 80-7204-243-3.
- [5] FRIČEK, Jakub. *Posuzování vstupních surovin pro výrobu žáromateriálů*. Brno, 2011. 43 s. Bakalářská práce. VUT v Brně, Stavební fakulta. Vedoucí práce Ing. Lenka Nevřivová, Ph.D
- [6] STAROŇ, Jozef a František TOMŠŮ. *Žiaruvzdorné materiály: Výroba, vlastnosti a použitie*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1992, 399 s. ISBN 80-050-1023-0.
- [7] KUTZENDÖRFER, Jaroslav a František TOMŠŮ. *Žárovzdorné materiály*. Vyd. 1. Praha: ČSVTS - Silikátová společnost České republiky, 2008. 99 s. ISBN 978-80-02-02076-9.
- [8] LACH, Vladimír. *Keramika*. 3. vyd. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1992, 172 s. ISBN 80-214-0332-2.
- [9] SLIVKA, Vladimír. *Těžba a úprava silikátových surovin*. 1. vyd. Praha: Silikátový svaz, 2002, 443 s. ISBN 80-903-1130-X.
- [10] Geofond. [online]. [cit. 2012-7-17]. Dostupné z: <http://www.geofond.cz/cz/domu>
- [11] KUTZENDOERFER, Jaroslav. *Žárovzdorné tepelně izolační materiály*. 1. vyd. Praha: Informatorium, 1991, 268 s. ISBN 80-854-2702-8.
- [12] ČSN EN 1094-2. *Žárovzdorné výrobky izolační: Část 2 - Klasifikace tvarových výrobků*. 1999.
- [13] STEHLÍK, Michal. *Building materials*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 171 s. ISBN 80-214-2544-X.
- [14] HANYKÝŘ, Vladimír a Jaroslav KUTZENDÖRFER. *Technologie keramiky*. Vyd. 2., V Silikátovém svazu 1. Praha: Silikátový svaz, 2008, 387 s., [9] s. barev. obr. příl. ISBN 978-80-86821-48-1.
- [15] KUTZENDOERFER, Jaroslav. *Žárovzdorné tepelně izolační materiály*. 1. vyd. Praha: Informatorium, 1991, 268 s. ISBN 80-854-2702-8.
- [16] SVOBODA, Luboš, et al. *Stavební hmoty*. 2. dopl. vyd. Bratislava : Jaga media, s.r.o., 2007. 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1.]

- [17] ŠAŠEK, Ladislav, et al. *Laboratorní metody v oboru silikátů*. Praha: Nakladatelství technické literatury SNTL, 1981. 319 s.
- [18] ADÁMEK, Jiří. *Stavební materiály*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1997, 205 s. ISBN 80-214-0631-3.
- [19] LACH, Vladimír a Marcela DAŇKOVÁ. *Mikrostruktura stavebních látek*. Vyd. 2. Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického, 1991. 178 s. ISBN 80-214-0309-8
- [20] PYTLÍK, Petr a Jaroslav KUTZENDÖRFER. *Cihlářství*. Vyd. 2., V Silikátovém svazu 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1995, 264 s. ISBN 80-214-0612-7.
- [21] PRASAD RANA, Raghunath, Atanu SUVRAJIT BAL a Badal PRAKASH PADHY. Solid waste utilization: Use of coal bottom ash as raw material for insulating castable. In: Aachen, Germany: EUROGRESS, 2012, s. 148-151.
- [22] SOKOLÁŘ, Radomír. *Keramika* [online]. [cit. 2012-10-10]. Studijní opory BJ01-M01. VUT FAST Brno, 176 s.

## Seznam souvisejících norem:

- ČSN EN 12475-4 Klasifikace žárovzdorných výrobků tvarových hutných - Část 4: Zvláštní výrobky
- ČSN EN ISO 10081-1 Klasifikace žárovzdorných výrobků tvarových hutných - Část 1: Hlinitokřemičité výrobky
- ČSN EN ISO 10081-2 Klasifikace žárovzdorných výrobků tvarových hutných - Část 2: Zásadité výrobky obsahující méně než 7 % zbytkového uhlíku
- ČSN EN ISO 10081-3 Klasifikace žárovzdorných výrobků tvarových hutných - Část 3: Zásadité výrobky obsahující 7 % až 50 % zbytkového uhlíku
- ČSN EN 993-15 Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 15: Stanovení tepelné vodivosti metodou topného drátu (paralelní uspořádání)
- ČSN EN 993-11 Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 11: Stanovení odolnosti proti náhlým změnám teploty
- ČSN EN 993-1 Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 1: Stanovení objemové hmotnosti, zdánlivé pórovitosti a skutečné pórovitosti
- ČSN EN 993-6 Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 6: Stanovení pevnosti v ohybu při teplotě místnosti
- ČSN EN 993-12 Zkušební metody pro žárovzdorné výrobky tvarové hutné - Část 12: Stanovení žárovzdornosti
- ČSN EN ISO 8894-1 Žárovzdorné materiály - Stanovení tepelné vodivosti - Část 1: Metoda topného drátu (křížové uspořádání a uspořádání s odporovým teploměrem)
- ČSN EN ISO 26845 Chemický rozbor žárovzdorných materiálů - Všeobecné požadavky pro chemický rozbor mokrým způsobem, atomovou absorpční spektrometrií (AAS) a atomovou emisní spektrometrií s induktivně vázanou plazmou (ICP-AES)
- ČSN EN ISO 21587-1 Chemický rozbor žárovzdorných výrobků hlinitokřemičitých (alternativa k rentgenové fluorescenční analýze) - Část 1: Přístroje, chemikálie, rozklad a vážkové stanovení oxidu křemičitého
- ČSN EN 1094-1 Žárovzdorné výrobky izolační - Část 1: Terminologie, klasifikace a metody zkoušení žárovzdorných izolačních vláknitých výrobků
- ČSN EN 1094-4 Žárovzdorné výrobky izolační - Část 4: Stanovení objemové hmotnosti a skutečné pórovitosti tvarových výrobků
- ČSN EN 1094-2 Žárovzdorné výrobky izolační - Část 2: Klasifikace tvarových výrobků
- ČSN 72 1072 (721072) Stanovení slínivosti keramických surovin a hmot
- ČSN 72 1074 Stanovení optimální a pracovní vlhkosti keramických těst Pfefferkornovým přístrojem
- ČSN 72 1565-11 Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení maximální porovnávací rychlosti nezávadného sušení. Stanovení kritické vlhkosti
- ČSN 72 0100 (720100) Základní postup rozboru silikátů - Všeobecná ustanovení
- ČSN 72 1073 (721073) Stanovení délkových změn keramických surovin sušením a pálením
- ČSN 72 0000 (720000) Keramické názvosloví
- ČSN 72 1565-7 (721565) Zkoušení cihlářských zemin. Stanovení pevnosti v ohybu



## Seznam použitých zkratk a symbolů:

[%]	procento
[°C, °F]	stupeň Celsia, stupeň Fahrenheita
[Pa, MPa]	pascal, megapascal
[nm, μm, mm]	nanometr, mikrometr, milimetr
[m, m <sup>2</sup> , m <sup>3</sup> ]	metr, metr čtvereční, metr krychlový
[N, kN]	newton, kilonewton
[kč]	koruna česká
[ks]	kus
[g, kg, t]	gram, kilogram, tuna
[V, eV]	volt, elektronvolt
[RTG]	rentgen, rentgenový(á)
[λ]	vlnová délka, součinitel tepelné vodivosti
[n]	řád difrakce
[d]	vzdálenost dvou sousedních rovin, deformační poměr
[Θ]	úhel dopadu záření
[F]	síla
[Rt]	pevnost v tahu za ohybu
[Rc]	pevnost v tlaku
[l]	vzdálenost podpor
[DTA]	diferenční termická analýza
[NV]	nasákavost
[PZ]	zdánlivá pórovitost
[OH]	objemová hmotnost
[ZH]	zdánlivá hustota
[w, wkb]	vlhkost, vlhkost kritického bodu
[CSB]	koeficient citlivosti k sušení
[DS]	délkové změny sušením
[DP]	délkové změny pálením
[DC]	délkové změny celkem
[r]	poloměr póru
[W, kW]	watt, kilowatt
[α, β]	alfa, beta
[s, min, hod]	sekunda, minuta, hodina
[K]	kelvin
[SL]	lehčený šamot
[ZŽ]	ztráta žíháním
[EP]	expandovaný perlit
[A]	plocha